

Estudo da Maquinabilidade de gesso para moldes, moldações e modelos

Ana Sofia Machado Andrade

Dissertação de Mestrado

Orientador da FEUP: Prof. Dr. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Co-orientador da FEUP: Prof. Dr. Rui Jorge de Lemos Neto

Orientador do INEGI: Eng. Rui Miguel Brás Soares



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho 2017

Resumo

A presente dissertação surge no âmbito do projeto ADIMAQ (Fabrico ADitivo por extrusão e MAQuinagem para produção híbrida de modelos, moldes e moldações de grandes dimensões), tendo como principal objetivo o estudo da maquinabilidade do gesso, através da análise de forças de maquinagem e acabamento superficial, tendo em conta uma gama de parâmetros de maquinagem e teor de humidade do material, em operações de fresagem frontal e/ou de canto.

Inicialmente, realizaram-se estudos sobre o processo de secagem do gesso, de forma a caracterizar o comportamento do material quando sujeito a diferentes condições e ambientes de secagem e averiguar a janela de condições operativas adequada para o presente estudo. Os estudos de maquinabilidade centraram-se essencialmente em duas fases: na primeira fase de ensaios, foi realizada uma matriz de ensaios correspondendo ao fatorial completo, e na segunda fase de ensaios, foi proposta uma matriz de ensaios baseada no método Taguchi (L_{18}). Em todos os ensaios de maquinagem de gesso, as variáveis consideradas foram o teor de humidade do material, a velocidade de corte, o avanço por dente e a profundidade de corte. Os parâmetros avaliados foram os esforços de maquinagem (F_x , F_y e F_z) e as rugosidades da superfície (R_a , R_z e R_{max}). De notar que os ensaios consistiram na fresagem de canais ao longo de provetes prismáticos (40x40x160mm) com fresa de diâmetro 20mm. Para além disso, foram testadas duas máquinas CNC distintas, assim como pastilhas de corte diferentes (PCD e WC).

Com os resultados, foi possível aplicar uma análise estatística ANOVA para avaliar a influência das variáveis do processo nos esforços de maquinagem e no acabamento superficial. Concluiu-se que as forças envolvidas na maquinagem de gesso são de baixa intensidade ($F_{max} \approx 15N$) e que estas se intensificam com o aumento velocidade de avanço e profundidade de corte. A rugosidade (R_a) é sempre inferior a 4 μm e é influenciada pelo teor de humidade do material, sendo que teores de humidade mais elevados causam menores rugosidades.

Importa também referir que, testes de maquinagem em gesso em verde revelaram a possibilidade de maquinar gesso 24 horas após vazamento, sem que ocorra adesão do material à ferramenta e às restantes superfícies já maquinadas. O estudo do tempo mínimo de secagem do gesso que permite a maquinagem tem grande importância para a viabilidade do processo híbrido aditivo-subtrativo.

Palavras-chave: Gesso, Maquinagem, Esforços de maquinagem, Acabamento superficial, Humidade, Fabrico Aditivo e Tecnologias híbridas.

Machinability studies of plaster for molds, moldings and models

Abstract

The present thesis arises from the ADIMAQ project (ADditive manufacturing by extrusion and MACHining for hybrid production of models, molds and moldings of large dimensions), with the main objective of performing machinability studies of gypsum plaster, through the analysis of machining forces and surface finishings, accounting for the machining parameters and moisture content of the material, involving slot milling.

Initially, studies were carried out on plaster drying process, in order to define the behavior of the material when subjected to different drying conditions and environments. The machinability studies focused essentially on two phases: in the first phase of tests, a complete factorial testing matrix was followed, and in the second phase of tests, Taguchi DoE test matrix was performed with an L_{18} matrix. In all plaster machining tests, the considered variables were the moisture content of the material, the cutting speed, the feed per tooth and the depth of cut. The evaluated parameters were the machining forces (F_x , F_y and F_z) and the surface roughness parameters (R_a , R_z and R_{max}). It should be noted that the tests consisted of slot milling along prismatic test pieces (40x40x160mm) using a milling cutter of 20mm diameter. In addition, two distinct CNC machines were used as well as different cutting inserts (PCD and WC).

With the results obtained, it was possible to apply the ANOVA statistical analysis to evaluate the influence of the process variables on the machining loads and surface finishing. It was concluded that the forces involved in plaster machining are of low intensity ($F_{max} \approx 15N$) and these intensify with increasing feed rate and depth of cut. The roughness (R_a) is always less than $4\mu m$ and it has been found that it is influenced by the moisture content of the material; higher moisture content lead to lower roughness values.

Also, green plater machining tests have revealed the possibility of machining plaster 24 hours after casting, with no material adhering to the tool and other machined surfaces. The study of the minimum drying time of plaster that allows the machining is of great importance for the viability of the additive-subtractive hybrid process.

Keywords: Gypsum Plaster, Machining, Machining forces, Finishing surface, Moisture content, Additive Manufacturing and Hybrid Technologies.

Agradecimentos

Em primeiro lugar expresso os meus agradecimentos ao Professor Abílio de Jesus, orientador na FEUP, pela disponibilidade, apoio e partilha de conhecimentos fundamentais à realização deste trabalho.

Agradeço ao Engenheiro Rui Soares, orientador no INEGI, pela disponibilidade, conselhos e partilha de ideias, tal como pelo acompanhamento na execução do trabalho.

Ao Professor Rui Neto, pela orientação quanto à decisão do rumo do trabalho e partilha do seu vasto conhecimento.

Ao Professor Miguel Figueiredo, pela sua disponibilidade e ajuda na aplicação do método Taguchi e análise estatística dos resultados.

Ao Professor Bogdan Chiriță, *Faculty of Engineering, Department of Management and Engineering of Industrial Systems, University of Bacau, Romania*, pelo contributo para a análise estatística dos resultados experimentais.

Ao Engenheiro Santiago Villa, pela sua preocupação e apoio durante o trabalho experimental e por todo o conhecimento técnico transmitido.

Ao Professor Ramiro Martins, pela sua disponibilidade para auxílio na verificação de resultados experimentais sobre medições de rugosidade.

A todos os colaboradores do INEGI (UTAF) por todo o auxílio prestado, em particular ao José Texeira pela disponibilidade, ajuda e conhecimento técnico transmitido ao longo de todo o trabalho experimental.

Por fim, um especial agradecimento aos meus pais, que sempre me proporcionaram o melhor e me apoiaram incondicionalmente. Ao meu namorado e amigos, fundamentais na minha vida.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do ADIMAQ – Fabrico ADItivo por extrusão e MAQuinagem para produção híbrida de modelos, moldes e moldações de grandes dimensões, Projeto em Co-Promoção (SI I&DT) com o número 003433, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) através do Fundos Europeus Estruturais e de Investimento (FEEI).



O autor agradece à operação *NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries*, projeto de I&D cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte ("NORTE2020"), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



Índice de Conteúdos

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	Apresentação das empresas participantes no projeto ADIMAQ.....	2
1.3	Objetivos do trabalho	3
1.4	Estrutura da dissertação	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Gesso	5
2.1.1	Formulações de gesso e propriedades mecânicas	7
2.1.2	Secagem.....	10
2.1.3	Moldes em gesso	11
2.2	Fabrico Aditivo.....	12
2.2.1	Contextualização histórica.....	13
2.2.2	Processos de FA para materiais cerâmicos	15
2.2.3	<i>Fused Deposition Molding</i>	16
2.2.4	Processos FA de grandes dimensões	19
2.3	Maquinagem.....	21
2.3.1	Introdução.....	21
2.3.2	Ferramentas de corte.....	22
2.3.3	Fresagem.....	25
2.3.4	Maquinagem de gesso	26
2.3.5	Tecnologias de maquinagem CNC para moldes de gesso	26
2.3.6	Influência do teor de humidade do gesso na maquinabilidade	28
2.3.7	Desgaste da ferramenta na maquinagem de gesso.....	29
2.4	Equipamentos de fabrico híbridos	30
3	Técnicas e procedimentos experimentais	32
3.1	Produção dos provetes de gesso	32
3.2	Ensaaios de secagem	33
3.3	Controlo dimensional de provetes	36
3.4	Operação de fresagem de topo	36
3.5	Máquinas	37
3.6	Ferramentas	39
3.6.1	Controle de desgaste da ferramenta	41
3.7	Medição de esforços de maquinagem	42
3.7.1	Instrumentação.....	42

3.7.2	Tratamento de dados	43
3.8	Sistema de fixação.....	44
3.9	Medição de rugosidades	45
3.10	Plano de ensaios	46
3.11	DoE Taguchi.....	49
4	Resultados e Discussão.....	52
4.1	Primeira fase de ensaios	52
4.1.1	Forças de maquinagem – humidade 0%	52
4.1.2	Forças de maquinagem - humidade 8%	53
4.1.3	Forças de maquinagem - humidade 20%	54
4.1.4	Forças de maquinagem – efeito da humidade	55
4.1.5	Rugosidades – humidade 0%	56
4.1.6	Rugosidades – humidade 8%	57
4.1.7	Rugosidades – humidade 20%	58
4.1.8	Rugosidade, Ra – humidade 0%, 8% e 20%	59
4.1.9	ANOVA – Rugosidade, Ra.....	60
4.2	Segunda fase de ensaios – Método Taguchi.....	64
4.2.1	ANOVA – Força de maquinagem, Fx.....	65
4.2.2	ANOVA – Força de maquinagem, Fy.....	68
4.2.3	ANOVA – Força de maquinagem, Fz.....	70
4.2.4	ANOVA – Rugosidade, Ra.....	72
4.2.5	ANOVA – Rugosidade, Rz.....	75
4.2.6	ANOVA – Rugosidade, Rmax	77
4.3	Desgaste da ferramenta	79
4.4	Comparação de resultados com máquinas e ferramentas diferentes	81
4.5	Ensaio complementares de maquinagem.....	83
4.5.1	Maquinagem em verde	83
4.5.2	Testes de espessura de parede	85
4.5.3	Qualidade de arestas vivas	85
4.5.4	Maquinagem de molde obtido por fabrico aditivo	86
5	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	89
	Referências.....	92
	ANEXO A: Ensaio preliminares de maquinagem.....	97
	ANEXO B: Ficha técnica da ferramenta	100

ANEXO C: Ficha técnica das pastilhas PCD.....	101
ANEXO D: Ficha técnica das pastilhas WC.....	102
ANEXO E: Ficha técnica da Célula de carga e amplificador usado no estudo experimental.....	103
ANEXO F: Desenhos sistema de fixação da célula de carga e provetes	107
ANEXO G: Verificação medição rugosidades	110

Índice de Figuras

Figura 1 – Logotipo do projeto ADIMAQ.....	1
Figura 2 – Logotipos das instituições participantes no projeto ADIMAQ	3
Figura 3 – Evolução temporal de: a) Resistência à compressão; b) Resistência à Tração (adaptado de [10]).....	10
Figura 4 - Variação da massa de provetes de várias formulações de gesso [1]	10
Figura 5 – Processo tradicional de produção de moldes em gesso [58].....	11
Figura 6 – Processo <i>Slip Casting</i> na indústria de cerâmica sanitária [58]	12
Figura 7 – Cronologia do FA [15]	13
Figura 8 - Crescimento do FA [18].....	15
Figura 9 – Equipamentos FA de gesso: a) ProJet® x60 Series da 3D Systems [22]; b) Perfactory® 4 Digital Dental Printer Series da EnvisionTEC [23]	16
Figura 10 – Esquema de funcionamento de uma máquina de FDM para polímeros com dois bicos de extrusão [26].....	17
Figura 11 - Esquema de funcionamento e constituição de uma cabeça de extrusão tipo seringa: a) por atuador linear; b) por atuação de ar comprimido [24]	18
Figura 12 - Esquema de funcionamento e constituição de uma cabeça de extrusão de rosca [24]	18
Figura 13 - Exemplos de aplicações do BAAM: a) <i>Shelby Cobra</i> ; b) módulo de edifício; c) PUV; d) <i>kayak</i> [28]	19
Figura 14 - Conceito de “impressão 3D” para edifícios pelo processo <i>Contour Crafting</i> [30]	20
Figura 15 – <i>Contour Crafting</i> , evidência de espátula lateral com inclinação variável (adaptado de [58])	20
Figura 16 – Esquema representativo do processo de maquinagem por arranque de aparta [31]	21
Figura 17 – Esquema representativo das forças de corte: a) forças ferramenta-aparta e forças peça-aparta; b) forças que atuam na ferramenta [31].....	22
Figura 18 - Evolução do desgaste na face de saída da ferramenta (adaptado) [31]	24
Figura 19 – Diferentes processos de fresagem: a) tangencial ou cilíndrica ou periférica; b) de topo ou frontal [31]	25
Figura 20 – Maquinagem de gesso: centro de maquinagem CNC [58]	27
Figura 21 – Maquinagem de gesso: robot industrial [58]	27
Figura 22 – Equipamentos híbridos: a) MPA da Hermle [39]; b) LASERTEC 65 3D da DMG MORI [40].....	31
Figura 23 – Software NX <i>Hybrid Additive Manufacturing</i> : a) evidência de operações de adição; b) de subtração de material [41]	31
Figura 24 – Moldes de silicone para execução dos provetes de gesso.....	33
Figura 25 – Variação da massa dos provetes ao longo do tempo de secagem.....	34

Figura 26 – Estimativa da perda de água (%) dos provetes ao longo do tempo de secagem	35
Figura 27 – Efeito da troca de provetes de ambiente de secagem na massa	35
Figura 28 - Operação de fresagem de topo de um canal (adaptado de [58])	37
Figura 29 - Máquina CNC Checkbox, da OUPPLAN CNC Routers [42]	37
Figura 30 – Fresadora CNC de 5 eixos [47]	38
Figura 31 – Fresa CoroMill R390-020A20-11M [43]	39
Figura 32 – Pastilha PCD - R390-11T304E-P4-NL CD1 [43]	40
Figura 33 – Pastilha WC - R390-11 T3 08M-MM S40T [43]	40
Figura 34 – Dimensões controladas nas pastilhas	41
Figura 35 – Microscópio <i>Mitutoyo</i>	41
Figura 36 – Representação das forças de maquinagem (adaptado de [44])	42
Figura 37 – Célula de carga KISTLER 9257B	43
Figura 38 – Amplificador de sinal KISTLER 5070A, cabo de ligação entre célula de carga- amplificador e sistema de aquisição de dados HBM <i>Spider8</i> e computador	43
Figura 39 - Exemplo de sinal de variação das forças em função do tempo de maquinagem	44
Figura 40 – Sistema de fixação de provetes e da célula de carga	45
Figura 41 – Representação de provete fixo	45
Figura 42 - Rugosímetro portátil <i>Hommel Tester T500</i> [46]	46
Figura 43 – Gráfico linear que representa as interações possíveis de analisar com matriz Taguchi $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ (adaptado)	50
Figura 44 – Forças de maquinagem para humidade 0%: a) F_x em função de f e a_p ; b) F_x em função de f e V_c ; c) F_y em função de f e a_p ; d) F_y em função de f e V_c ; e) F_z em função de f e a_p ; f) F_z em função de f e V_c	53
Figura 45 – Forças de maquinagem para humidade 8%: a) F_x em função de f e a_p ; b) F_x em função de f e V_c ; c) F_y em função de f e a_p ; d) F_y em função de f e V_c ; e) F_z em função de f e a_p ; f) F_z em função de f e V_c	54
Figura 46 – Forças de maquinagem para humidade 20%: a) F_x em função de f e a_p ; b) F_x em função de f e V_c ; c) F_y em função de f e a_p ; d) F_y em função de f e V_c ; e) F_z em função de f e a_p ; f) F_z em função de f e V_c	55
Figura 47 – Forças de maquinagem para humidade 0%, 8% e 20%: a) F_x em função de h e V_c ; b) F_y em função de h e V_c ; c) F_x em função de h e a_p ; d) F_y em função de h e a_p ; e) F_x em função de h e f ; f) F_y em função de h e f	56
Figura 48 – Rugosidades para humidade 0%: a) R_a em função de f e a_p ; b) R_a em função de f e V_c ; c) R_z em função de f e a_p ; d) R_z em função de f e V_c ; e) R_{max} em função de f e a_p ; f) R_{max} em função de f e V_c	57

Figura 49 – Rugosidades para humidade 8%: a) Ra em função de f e ap; b) Ra em função de f e Vc; c) Rz em função de f e ap; d) Rz em função de f e Vc; e) Rmax em função de f e ap; f) Rmax em função de f e Vc.	58
Figura 50 – Rugosidades para humidade 20%: a) Ra em função de f e ap; b) Ra em função de f e Vc; c) Rz em função de f e ap; d) Rz em função de f e Vc; e) Rmax em função de f e ap; f) Rmax em função de f e Vc.	59
Figura 51 – Rugosidade Ra para humidade 0%, 8% e 20%: a) Ra em função de h e Vc; b) Ra em função de h e f; c) Ra em função de h e ap.	60
Figura 52 – Efeitos na rugosidade Ra: a) Humidade h; b) Velocidade de corte, Vc; c) Velocidade de avanço, f	62
Figura 53 – Efeito das interações: a) Humidade - Velocidade de corte; b) Humidade – Velocidade de avanço; c) Velocidade de corte - Velocidade de avanço.....	63
Figura 54 – Otimização do processo.....	64
Figura 55 – Efeitos dos parâmetros na força de maquinagem Fx: a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte.....	66
Figura 56 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na força Fx.....	67
Figura 57 - Efeitos dos parâmetros na força de maquinagem Fy: a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte.....	69
Figura 58 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na força Fy.....	70
Figura 59 - Efeitos dos parâmetros na força de maquinagem Fz: a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte.....	71
Figura 60 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na força Fz	72
Figura 61 - Efeitos dos parâmetros na rugosidade Ra: a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte.....	74
Figura 62 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na rugosidade Ra	75
Figura 63 - Efeitos dos parâmetros na rugosidade Rz: a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte.....	76
Figura 64 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na rugosidade Rz	77
Figura 65 - Efeitos dos parâmetros na rugosidade Rmax: a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte.....	78
Figura 66 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na rugosidade Rmax	79
Figura 67 - Dimensões controladas nas pastilhas de WC	79
Figuras 68 – Maquinagem em verde, evidência de formação de apara aderente ao provete: a) tempo de secagem = 40min, Vc = 700 m/min, f = 11000 mm/min; b) tempo de secagem = 60min, Vc = 700 m/min, f = 8000 mm/min; c) tempo de secagem = 50min, Vc = 150 m/min, f = 2400 mm/min.	84

Figura 69 – Representação do sentido de rotação e avanço da fresa e da zona de acumulação de apara de gesso.....	85
Figura 70 – Maquinagem de paredes de espessura 5 mm	85
Figura 71 – Provette com indicação de zonas onde as arestas quebram.....	86
Figura 72 – Processo de fabrico aditivo de molde em gesso.....	87
Figura 73 – Peça molde maquinada.....	87
Figuras 74 - Resultados dos ensaios preliminares de maquinagem.....	98
Figura 75 - Efeito da variação da velocidade de corte e da velocidade de avanço na rugosidade Ra	99

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características do sulfato de cálcio nos diferentes estados de hidratação (adaptado de [1])	5
Tabela 2 – Formulações de gesso sem aditivos, com indicação de temperatura e tempo de fim de presa (adaptado de [1]).....	7
Tabela 3 - Formulações de gesso com aditivos, com indicação de temperatura e tempo de fim de presa (adaptado) [1]	8
Tabela 4 – Resultados de ensaios de flexão em 3 pontos para formulações sem aditivos [1]	9
Tabela 5 – Resultados de resistência à compressão e à tração em função do tempo para <i>grey calcined gypsum</i> (adaptado de [10]).....	9
Tabela 6 – Classificação ASTM dos processos de FA	14
Tabela 7 - Propriedades mecânicas e físicas de materiais para ferramentas [32]	23
Tabela 8 – Quadro resumos de parâmetros de corte	25
Tabela 9 – Quadro resumo acerca dos desgastes para ferramentas de vários materiais em maquinagem de formulações de gesso.....	30
Tabela 10 – Características da máquina CNC Checkbox, da OUPPLAN CNC Routers [46]	38
Tabela 11 – Especificações da fresadora CNC de 5 eixos, da TECMACAL Industrial Solutions [47]	39
Tabela 12 – Quadro resumo das séries de ensaios de maquinagem realizados.....	47
Tabela 13 – Gamas de parâmetros de corte selecionados para a primeira fase de ensaios	48
Tabela 14 – Parâmetros de corte para primeira fase de ensaios.....	48
Tabela 15 – Matriz Taguchi $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ (adaptada).....	50
Tabela 16 – Gama de parâmetros de corte selecionados para a segunda fase de ensaios	51
Tabela 17 – Plano de ensaios Taguchi	51
Tabela 18 – Resultados do teste ANOVA para rugosidade R_a	61
Tabela 19 – Resultados ANOVA para força F_x	65
Tabela 20 - Resultados ANOVA para força F_y	68
Tabela 21 - Resultados ANOVA para força F_z	70
Tabela 22 - Resultados ANOVA para rugosidade R_a	73
Tabela 23 - Resultados ANOVA para rugosidade R_z	75
Tabela 24 - Resultados ANOVA para rugosidade R_{max}	77
Tabela 25 – Variações registadas nas medições das pastilhas de WC para verificação de desgaste	79
Tabela 26 – Tempos de maquinagem ensaios Taguchi.....	80
Tabela 27 – Parâmetros de corte usados nos ensaios para comparação de máquinas e ferramentas	81

Tabela 28 – Comparação de forças de corte obtidas em máquinas diferentes e com pastilhas diferentes	82
Tabela 29 - Comparação de rugosidades obtidas em máquinas diferentes e com pastilhas diferentes	82
Tabela 30 – Parâmetros de corte dos ensaios preliminares de maquinagem	97
Tabela 31 – Verificação de medição de rugosidades	110

Lista de acrónimos

3D – Três Dimensões

ABS – Acrilonitrilo Butadieno Estireno

AM – *Additive Manufacturing*

ANOVA – *Analysis of Variance*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BAAM – *Big Area Additive Manufacturing*

BPM – *Ballistic Particle Manufacturing*

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

CFRP – Plásticos reforçados com fibra de carbono

CNC – *Computer Numerical Control*

CVD – Deposição por vapor químico

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*

DoE – *Design of Experiments*

EFF – *Extrusion Freeforming*

FA – Fabrico Aditivo

FDC – *Fused Deposition Ceramics*

FDM – *Fused Deposition Molding*

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HSM – Maquinagem a alta velocidade

HSS – Aços rápidos

INEGI – Instituto de Ciências e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

LOM – *Laminated Object Manufacturing*

MMC – Compósitos de matriz metálica

PCD – Diamante policristalino

RC – *Robot Casting*

SLA - Estereolitografia

SLS – *Selective Laser Sintering*

UTAF – Unidade de Tecnologias Avançadas de Fabrico

Lista de símbolos

ae – Penetramento de trabalho
ap – Profundidade de corte
Dc – Diâmetro da ferramenta
f – Velocidade de avanço
Fmax – Força de corte máxima
Fx – Força de corte segundo a direção x
Fy – Força de corte segundo a direção y
Fz – Força de corte segundo a direção z
h – Humidade relativa
L – Comprimento de maquinagem
n – Frequência de rotação
Q – Taxa de remoção de material
Ra – Rugosidade média aritmética
Rmax – Rugosidade máxima
Rz – Rugosidade média máxima
T – Tempo de vida da ferramenta
Tc – Tempo de maquinagem
Vc – Velocidade de corte
Z – Número de dentes

Compostos químicos

Al_2O_3 – Óxido de alumínio
 CaSO_4 (sol.) – Sulfato de cálcio desidratado
 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ – Sulfato de cálcio hemihidratado
 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – Sulfato de cálcio hidratado
 H_2O – Água
 K_2SO_4 – Sulfato de potássio
 Si_3N_4 – Nitreto de Silício
TiC – Carboneto de Titânio
CBN – Nitreto de Boro cúbico
WC – Carboneto de Tungsténio

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A presente dissertação foi elaborada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na especialização em Produção, Conceção e Fabrico.

Esta dissertação, intitulada “Estudo da Maquinabilidade de gesso para moldes, moldações e modelos”, foi realizada no âmbito do projeto ADIMAQ (Fabrico ADItivo por extrusão e MAQuinagem para produção híbrida de modelos, moldes e moldações de grandes dimensões). O projeto ADIMAQ resulta da parceria entre as empresas CEI by Zipor e FERESPE e o instituto de interface INEGI, através da unidade UTAF – Unidade de Tecnologias Avançadas de Fabrico.

O projeto ADIMAQ (Figura 1) tem como principal objetivo o desenvolvimento de equipamento híbrido que combina as tecnologias de fabrico aditivo (FA) por extrusão/deposição de pastas e fabrico subtrativo (FS), através de maquinagem em 5 eixos, capaz de fabricar moldes/moldações e modelos em diferentes materiais com eficiências acrescidas em termos de custo, utilização de matérias-primas e exploração de geometrias. Esta ideia surge da necessidade identificada juntos das empresas fornecedoras de peças e componentes em materiais metálicos fundidos, materiais cerâmicos e materiais compósitos, as quais são cada vez mais solicitadas para séries mais curtas e para componentes mais complexos e de grande dimensão. Os materiais alvo de estudo no projeto ADIMAQ correspondem às principais matérias-primas dos moldes/moldações/modelos destas indústrias, nomeadamente areia de sílica, gesso e resina termoendurecível.



Figura 1 – Logotipo do projeto ADIMAQ

No âmbito desta dissertação pretende-se estudar especificamente a maquinabilidade do gesso, material que tem interesse industrial, principalmente na área da indústria cerâmica, e que não tem sido alvo de estudos aprofundados na literatura, verificando-se alguma escassez bibliográfica acerca do tema, não existindo mais do que dez publicações científicas sobre maquinagem de gesso.

1.2 Apresentação das empresas participantes no projeto ADIMAQ

Nesta secção apresentam-se os perfis das empresas participantes no projeto ADIMAQ. O INEGI é simultaneamente instituição participante no projeto ADIMAQ e instituição de acolhimento deste trabalho de investigação.

O **INEGI** – Instituição de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial apresenta-se como uma organização sem fins lucrativos, que promove a ligação entre a Indústria e a Universidade do Porto, vocacionando-se para a atividade de investigação e de inovação de base tecnológica. A instituição nasce, em 1986, no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da FEUP. Nos últimos 30 anos, tem desenvolvido e consolidado uma posição de parceiro da indústria em projetos de ID&I. Cerca de 60% da sua atividade baseia-se ainda na consultadoria, a par de diversos projetos. Com o estatuto de “Utilidade Pública” e com a figura jurídica de “Associação Privada sem Fins Lucrativos”, o INEGI apresenta-se como um agente responsável no desenvolvimento de tecido empresarial nacional, sendo um auxílio no desenvolvimento e consolidação de um modelo competitivo baseado na inovação de base tecnológica, no conhecimento e na densidade tecnológicas dos produtos e processos [1].

A **CEI by Zipor** - Centro de Equipamentos Industriais, fundada em 1995, é uma empresa europeia, líder em soluções de corte, para a indústria do calçado e de rochas ornamentais. A sua estratégia passa por apostar em tecnologias transversais a vários sectores industriais promovendo a diversificação da sua atividade. Em linha com esta estratégia, tem vindo a desenvolver uma gama completa de produtos através de soluções que satisfazem diferentes sectores industriais tais como tecnologia de corte por jato de água, fresagem, tecnologia a laser e tecnologia robótica. Os sectores industriais das rochas ornamentais, calçado, automóvel, aeronáutica, metalomecânica são alguns exemplos. Desde o seu início que aposta no desenvolvimento de *know-how* tendo-se tornado uma marca com reconhecimento internacional pela excelência em tecnologias de jato de água, CNC, CAD/CAM, laser e robótica que possibilitam a criação e fabrico, em Portugal, de equipamentos de alta tecnologia. Prova do seu reconhecimento internacional é, em 2004, ser marca de 2000 equipamentos instalados em 56 países. A CEI conta com vários prémios a nível de inovação tecnológica destacando-se, sobretudo, na área do calçado [2].

A **Ferespe** - Fundição de Ferro e Aço, Lda., fundada em 1981, começou por produzir Ferros de alta liga por ser um nicho de mercado em Portugal. No entanto, com o passar dos anos, e uma vez que este nicho não era suficiente para a dinâmica dos seus 78 colaboradores, aumentou a sua abrangência passando a produzir também Aços de alta, média e baixa liga. Uma década depois desta mudança, destaca-se como fundição de aços inoxidáveis super-duplex e super-austeníticos. O seu nicho de mercado atual caracteriza-se por pequenas e médias séries com exigências de prazos de entrega curtos e elevados padrões de qualidade. A capacidade de venda de peças fundidas ferrosas é de 1.100 ton/ano sendo a maioria para exportação (85%). As aspirações da empresa levam a que se envolva frequentemente em projetos de investigação e desenvolvimento em diferentes áreas através de parcerias com Universidades, Centros de Investigação, Centros Tecnológicos e outras empresas tanto a nível nacional como internacional [3]. Na Figura 2 ilustram-se os logotipos das instituições participantes no projeto ADIMAQ.



Figura 2 – Logotipos das instituições participantes no projeto ADIMAQ

1.3 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo da maquinabilidade de gesso para aplicação em tecnologia de fabrico híbrida. Mais especificamente, pretende-se rever o estado da arte acerca do processo de maquinagem, mas também de processos de fabrico aditivo e tecnologias híbridas. A pesquisa e análise de publicações científicas relacionadas com o tema desta dissertação também é um dos objetivos, de forma a reunir o máximo de informação útil à execução desta investigação.

Um dos objetivos é estudar o gesso, através de pesquisa bibliográfica e de trabalho experimental para aferir o seu comportamento sob condições de secagem e de corte específicas. O trabalho experimental deve centrar-se na execução de ensaios de maquinagem testando vários parâmetros de corte e estados do material em termos de humidade relativa, e avaliar a sua influência nos esforços de maquinagem e qualidade do acabamento superficial. Pretende-se ainda, estudar a influência e interação das variáveis do processo nos resultados experimentais.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida essencialmente em três capítulos, nomeadamente revisão bibliográfica, técnicas e procedimentos experimentais e resultados e discussão. No capítulo da revisão bibliográfica (Capítulo 2) aborda-se o gesso, suas características, formulações, propriedades físicas e mecânicas, processo de secagem e aplicações industriais. Seguidamente, apresenta-se um subcapítulo sobre fabrico aditivo, com ênfase no processo de FDM e síntese de processos de fabrico aditivo para materiais cerâmicos e para produção de peças de grandes dimensões. Depois, foca-se a maquinagem, com abordagem do processo, ferramentas de corte, operação de fresagem, maquinagem de gesso e desgaste de ferramentas. O capítulo de revisão bibliográfica termina com informações acerca de tecnologias de fabrico híbrido.

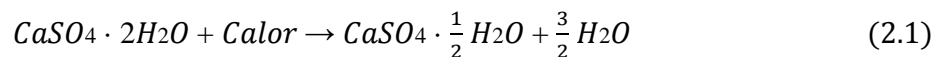
O capítulo das técnicas e procedimentos experimentais (Capítulo 3) reúne informação relativa a máquinas, ferramentas, instrumentação e sistemas de fixação usados para a execução do trabalho experimental, bem como informação relativa aos planos de ensaios realizados. Explica-se como é feita medição das variáveis em estudo e os procedimentos usados na execução de ensaios e tratamento de resultados. No capítulo de resultados e discussão (Capítulo 4) apresentam-se todos os resultados obtidos na primeira e segunda fases de ensaios, através de gráficos e tabelas e recorrendo a ANOVA, com discussão dos respetivos resultados. Expõe-se ainda informação relativa a outros ensaios complementares de maquinagem realizados. O trabalho finaliza com o Capítulo 5 relativo às conclusões dos estudos efetuados e propostas de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Gesso

O gesso tem origem num mineral, gipsite, que resulta da sedimentação de rochas muito macias. A facilidade de desidratação e re-hidratação do gesso justifica a grande diversidade de aplicações. As principais aplicações são em áreas como a indústria cerâmica, a construção civil, a indústria farmacêutica, o sector agrícola, a medicina, entre outras [4, 5].

Na indústria cerâmica, o gesso usado é um pó de cor branca, cinzenta ou rosada, constituído essencialmente por sulfato de cálcio hemihidratado, que é obtido através da desidratação controlada do sulfato de cálcio hidratado por remoção de cerca de 75% da água de cristalização, Equação (2.1) [4, 6, 7]:



O sulfato de cálcio existe sob três formas: hidratado, hemihidratado e desidratado. O gesso encontra-se no estado hemihidratado e pode ainda ser alfa (α) ou beta (β). De notar que as diferenças entre gesso α e β devem-se ao processo de produção. O gesso α é produzido através de imersão em água, vapor de água, ácidos ou soluções salinas e o gesso β é produzido através da secagem de gesso hidratado com ar seco ou vácuo, ambos a temperaturas superiores a 45°C [4, 8]. Na Tabela 1 apresentam-se algumas características do sulfato de cálcio nos diferentes estados de hidratação.

Tabela 1 - Características do sulfato de cálcio nos diferentes estados de hidratação (adaptado de [4])

Características	Hidratado (Gipsite)	Hemihidratado (Gesso)		Desidratado	
		α	β	Anidrite solúvel	Anidrite insolúvel
Fórmula	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$		CaSO_4 (sol.)	CaSO_4 (insol.)
Massa molecular (g/mol)	172,17	145,15		136,14	136,14
Densidade (g/cm ³)	2,31	2,76	2,62-2,64	2,58	2,9-3,0
Dureza escala de Mohs	1,5	-	-	-	3-4
Solubilidade em água a 20°C (g/dm ³)	2,1	6,5	≈ 8,8	Hidrata para hemihidratado	2,7

Geralmente, dependendo do tipo de gesso, este demora cerca de 10-20 minutos a endurecer, quando misturado em água em proporções adequadas. Mas este tempo pode ser prolongado ou diminuído com a adição à mistura de retardadores ou aceleradores de tempo de presa. O tempo

que decorre desde o momento que o pó de gesso e a água entram em contato (início da mistura) até o momento em que o material esteja endurecido chama-se tempo de presa. Os retardadores promovem a desidratação dos gessos hemihidratados, enquanto os aceleradores promovem a hidratação. Estes dois efeitos no tempo de endurecimento são importantes para diferentes aplicações do gesso [4-6].

O acelerador mais comum é o próprio gesso, quando misturado gesso hidratado a um hemihidratado. No entanto, a sua utilização provoca alteração da morfologia do material. Esta mudança reduz significativamente as ligações intercristalinas, o que leva a uma diminuição da resistência mecânica do gesso. Também o amido ou sulfato de potássio, ácidos inorgânicos fortes, assim como sais de ácidos fortes e bases fortes ou fracas são considerados aceleradores. O sulfato de potássio é considerado o acelerador mais eficaz [4, 5, 9].

Por sua vez, os retardadores de tempo de presa podem ser ácidos orgânicos fracos e os seus sais com bases fortes, mas também proteínas e sais de ácido fosfórico ou ácido bórico. Ainda os ácidos cítrico, málico, sucínico e tartárico funcionam como retardadores, sendo o ácido cítrico considerado o mais eficaz. No entanto, é de salientar que o efeito quer dos retardadores, quer dos aceleradores está relacionado com a quantidade destes adicionada à mistura [4, 9].

Outros aditivos são também usuais, tais como os superplastificantes, que visam o aumento da fluidez do gesso e a sua processabilidade. Estes promovem a diminuição do teor de água e o aumento da resistência mecânica necessária para a correta mistura. É de salientar que o aumento da fluidez e processabilidade das pastas de gesso dependem da concentração do superplastificante. A adição de superplastificantes provoca ainda uma diminuição do tempo de endurecimento do gesso β -hemihidratado [4, 8, 10].

Quanto à viscosidade do material, sabe-se que a formulação usada terá maior ou menor viscosidade, dependendo da consistência da mistura, ou seja, da relação gesso/água utilizada e aumentará com o passar do tempo de endurecimento. A viscosidade depende também da existência ou não de aditivos, suas características e quantidades adicionadas à mistura [4].

O gesso é um material que apresenta algumas limitações para processamento através de maquinagem devido às suas propriedades mecânicas, particularmente a elevada fragilidade e a baixa dureza. Os principais problemas na maquinagem de gesso são [4, 11]:

- dificuldade em produzir arestas vivas;
- geração de poeiras que se acumulam na zona de corte;
- maquinagem de espessuras reduzidas;
- dificuldade em produzir cavidades profundas.

Para contrariar as limitações do material, têm sido desenvolvidas pastas de gesso aditivadas com diversos materiais que conferem uma maior resistência à fragmentação durante a maquinagem. Os materiais poliméricos, correntemente designados por superplastificantes, quando adicionados ao gesso, conferem maquinabilidade e maior resistência mecânica [4, 8].

No que diz respeito ao fabrico aditivo, à partida, o gesso é um bom candidato ao processo. No entanto, é necessário um estudo acerca da consistência do material que permita o fabrico de peças por tecnologias de adição. Características como a viscosidade das pastas e adesão do material entre camadas de deposição são cruciais para a viabilidade da utilização do material.

Contudo, a implementação de tecnologias de fabrico aditivo na indústria de moldes e moldações em gesso vem minimizar alguns problemas. A principal vantagem deste processo é permitir a produção de pequenas séries de moldes ou modelos para o fabrico de peças customizadas com menores custos. Outro aspeto é o desperdício de material, que gerado pelo fabrico de peças em gesso por maquinagem pode chegar aos 96%, mas se em alternativa se usar fabrico aditivo, a redução de desperdício é da ordem de 40% [4, 12].

2.1.1 Formulações de gesso e propriedades mecânicas

Como já referido, o gesso pode ser essencialmente de dois tipos, α ou β . Mas o gesso é um material que resulta de uma mistura de água e pó de gesso, que pode ser feita com diferentes proporções das partes. Assim, existem diversas formulações de gesso e algumas são apresentadas na Tabela 2. De notar que o tempo de embeber ocorre logo após à junção da água ao gesso em pó e nesta fase o gesso absorve uma quantidade inicial de água, que facilita uma mistura homogênea posteriormente.

Tabela 2 – Formulações de gesso sem aditivos, com indicação de temperatura e tempo de fim de presa (adaptado de [4])

Mistura	% H ₂ O	Temp. H ₂ O (°C)	Tempo embeber (s)	Tempo misturar (s)	Temp. máxima (°C)	Tempo fim presa (min.)
α	30	20	90	180	44,4	45
α	40	20	90	180	44	45
50% α + 50% β	40	20	90	180	44,6	31
β	55	20	90	180	43,7	24
β	60	20	90	180	44	29
β	60	40	90	180	50,7	29
β	60	55	90	180	53,1	28

No contexto deste trabalho serão usadas apenas formulações de gesso β . Pela análise da Tabela 2, percebe-se que a alteração da temperatura da água não afeta o tempo de presa, ou seja, o tempo de endurecimento do gesso. Por isso, na referência [4] é recomendado o uso de gesso β , com 60% de água à temperatura de 20°C.

Os tempos de fim de presa apresentados revelam um dos principais desafios do projeto ADIMAQ. É necessário muito tempo até ao endurecimento do gesso, o que constitui uma limitação quando se trata da produção de peças em gesso através de impressão 3D [4].

As formulações de gesso podem conter aditivos, com o objetivo de melhorar algumas propriedades do material para diferentes aplicações. Deste modo, na Tabela 3 são apresentados exemplo de formulações de gesso com aditivos.

Tabela 3 - Formulações de gesso com aditivos, com indicação de temperatura e tempo de fim de presa (adaptado de [4])

Mistura	%Total Líquidos	Tempo embeber (s)	Tempo misturar (s)	Temp. máxima (°C)	Tempo fim presa (min.)
α + 3% K_2SO_4 + 20% Poli Disp 7252 + 0,05% Antiespumante	40	15	15	42,8	31
β + 3% K_2SO_4 + 20% Poli Disp 7252 + 0,05% Antiespumante	60	15	15	47,3	10
50% α + 50% β + 3% K_2SO_4 + 20% Poli Disp 7252 + 0,05% Antiespumante	40	15	15	45,4	18

De uma forma geral, as formulações de gesso com aditivos apresentam tempos de fim de presa inferiores às formulações sem aditivos, uma vez que a adição de aceleradores como K_2SO_4 diminuem os tempos de fim de presa.

Na Tabela 4 apresentam-se propriedades físicas e mecânicas do gesso para três formulações sem aditivos. Estes resultados foram obtidos através de ensaios de flexão em três pontos de acordo com a norma ASTM 674-88, de três provetes de cada formulação e publicados na referência [4].

Estudos acerca da influência do tempo de endurecimento e estabilização do gesso (*grey calcined gypsum*) nas propriedades mecânicas [13] revelaram que os valores das propriedades mecânicas do gesso começaram a aumentar especialmente após 4 dias de endurecimento e

estabilizaram-se após 14 dias. A comparação entre provetes secos e saturados, evidenciou a influência negativa da humidade na resistência mecânica, quer à compressão, que à tração. A Tabela 5 e a Figura 3 mostram os resultados obtidos ao longo do tempo para a resistência à compressão e à tração.

Tabela 4 – Resultados de ensaios de flexão em 3 pontos para formulações sem aditivos [4]

Formulação		Comp. (mm)	Larg. (mm)	Alt. (mm)	Peso (g)	Força máx. (N)	Média das Forças máx. registadas (N)	Mr (módulo rotura) (MPa)	Média de Mr (MPa)
$\alpha + 40\%$ H ₂ O	A	158,82	40,73	39,71	384,4	3503	3574	8,18	8,44
	B	159,42	40,05	39,5	384,4	3345		8,03	
	C	159,69	40,38	39,75	385,8	3874		9,11	
$\beta + 60\%$ H ₂ O	A	159,82	40,69	40,21	299,7	2464	2413	5,62	5,53
	B	158,79	40,28	40,2	302,6	2491		5,74	
	C	159,58	40,48	40,18	302,6	2283		5,24	
50% $\alpha +$ 50% $\beta +$ 40% H ₂ O	A	159,66	40,43	40,7	386	3351	4012	7,51	8,93
	B	159,04	40,96	40,72	389	4025		8,89	
	C	159,26	40,8	40,58	388,4	4661		10,41	

Tabela 5 – Resultados de resistência à compressão e à tração em função do tempo para *grey calcined gypsum* (adaptado de [13])

Tempo (dias)	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração (MPa)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0.041	3.02	0.526	1.81	0.101
0.0625	3.65	0.088	-	-
0.125	3.01	0.052	1.61	0.122
0.25	2.31	0.348	1.43	0.085
0.375	2.21	0.042	1.32	0.030
1	1.86	0.225	1.17	0.040
2	1.94	0.141	1.12	0.044
3	2.63	0.103	1.42	0.128
4	2.18	0.065	1.13	0.057
7	3.47	0.752	1.51	0.109
14	9.42	0.321	4.07	0.449
180	9.62	0.685	3.58	0.354

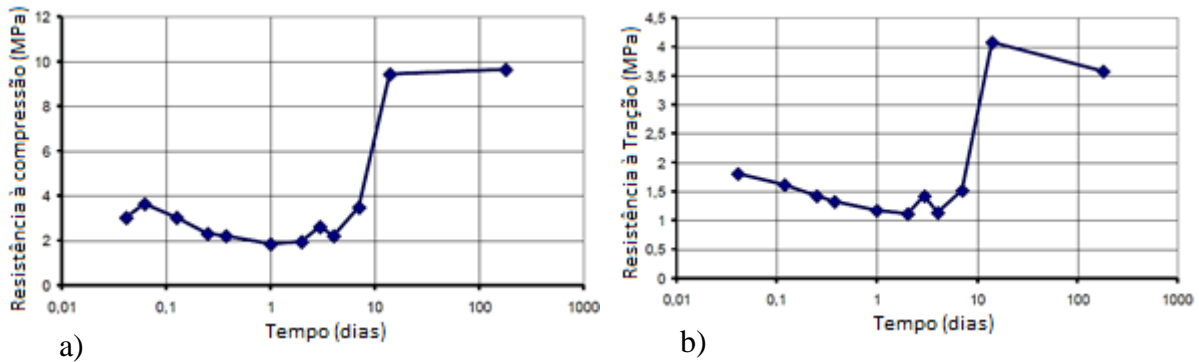


Figura 3 – Evolução temporal de: a) Resistência à compressão; b) Resistência à Tração (adaptado de [13])

2.1.2 Secagem

Quando se pretende trabalhar com gesso, importa perceber o seu processo de secagem. De facto, depois de se vaziar um provete de gesso, este começa imediatamente a perder água até solidificar (tempo de presa). Mas a perda de água continua até o material ficar em equilíbrio com o ambiente, em termos de humidade. A perda de água é geralmente estimada pela variação de massa no gesso. Assim, segundo a norma BS EN 12859:2011, um provete encontra-se com massa constante quando a variação de duas pesagens do mesmo distanciadas por 24 horas é inferior a 0,1%.

A Figura 4 mostra a variação da massa de provetes de várias formulações de gesso, ao longo do processo de secagem a temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ [4].

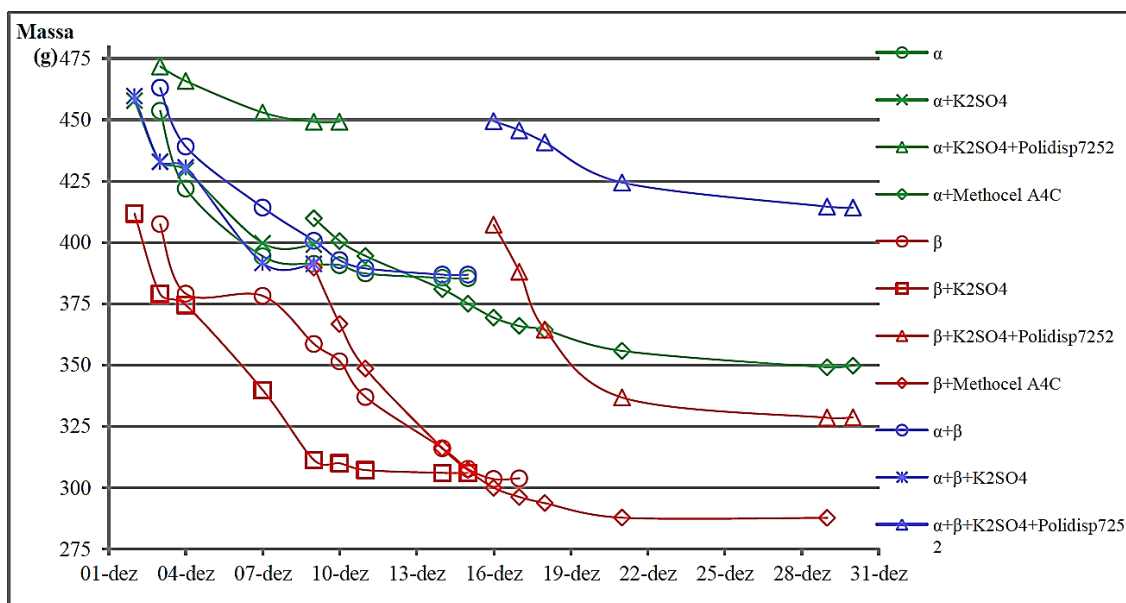


Figura 4 - Variação da massa de provetes de várias formulações de gesso [4]

Em primeiro lugar, a análise da Figura 4 permite ter percepção do tempo médio de secagem de um provete de gesso à temperatura ambiente de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, ou seja, entre 20 e 30 dias. Em geral, as formulações de gesso do tipo β apresentam menor massa do que as do tipo α , porque as primeiras contêm maior percentagem de água, o que resulta numa perda de massa mais acentuada para os gessos do tipo β . Pode-se observar que todas as formulações apresentam perda de massa mais acentuada nos primeiros dias, que depois tende a suavizar. Verifica-se também que para as diferentes formulações, os tempos de secagem até atingir variações de massa inferiores a 0,1% são distintos [4].

2.1.3 Moldes em gesso

A produção direta de moldes em gesso na indústria cerâmica (em particular nas cerâmicas sanitárias), através de tecnologia de fabrico híbrido, permite ultrapassar um estágio do processo, nomeadamente, a maquinagem de um modelo em poliuretano (ou outra resina termoendurecível) e a sua conversão em gesso (Figura 5). Este facto traduz-se numa redução do tempo de produção para pequenas séries e, por isso, numa vantagem competitiva. A eliminação do estágio de produção de modelos em poliuretano poderá ter um impacto muito significativo na etapa de desenvolvimento do molde, sempre sujeita a iterações. É ainda de salientar a diferença de preço entre o poliuretano (20€/kg) e o gesso (0,20 €/kg) [14].

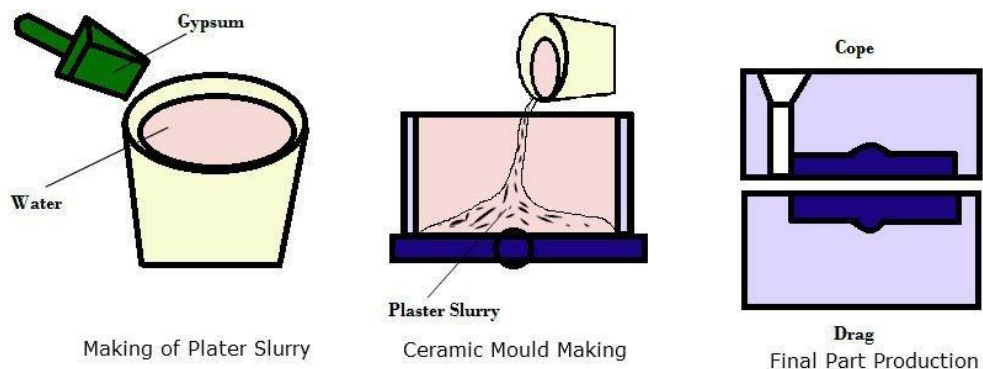


Figura 5 – Processo tradicional de produção de moldes em gesso [15]

Os moldes em gesso são geralmente usados na indústria cerâmica para vazamento de barbotinas cerâmicas de porcelana para fabricar cerâmicas decorativas e sanitárias pelo processo de *slip casting* (Figura 6). A indústria cerâmica utiliza gesso devido ao seu baixo custo e às suas características reológicas. Na verdade, a porosidade natural do gesso e inerente capilaridade é essencial para garantir a absorção de parte do líquido da suspensão cerâmica e, assim, assegurar a criação de uma parede de material semiduro junto à superfície do molde. A

eliminação do excesso de água das barbotinas cerâmicas é muito importante para que estas adquiram resistência e tornem os produtos cerâmicos verdes autoportantes [14].

O modelo usado para o fabrico de um molde tem dimensões ligeiramente superiores à peça final, de modo a compensar a contração do material cerâmico na fase de sinterização. Existe também uma ligeira contração do material cerâmico após o vazamento à medida que este perde humidade e começa a solidificar. Posto isto, na indústria cerâmica primeiro são produzidos moldes em gesso a partir de modelos maquinados em poliuretano (ou outra resina termoendurecível) para a obtenção da madre. Estes moldes simples são retificados ou refeitos consoante a contração de material cerâmico registada (ensaios preliminares), até ser possível obter uma peça com as dimensões e formas pretendidas. Depois deste processo é fabricado o modelo que vai dar origem aos moldes finais para produção em série. O estágio de desenvolvimento do molde para o modelo é um processo iterativo, moroso e dispendioso, principalmente quando não é possível retificar o molde em gesso e é necessário fabricar um novo modelo em poliuretano. Contudo, é uma fase essencial para assegurar uma produção em série eficiente e com o mínimo de defeitos [14].

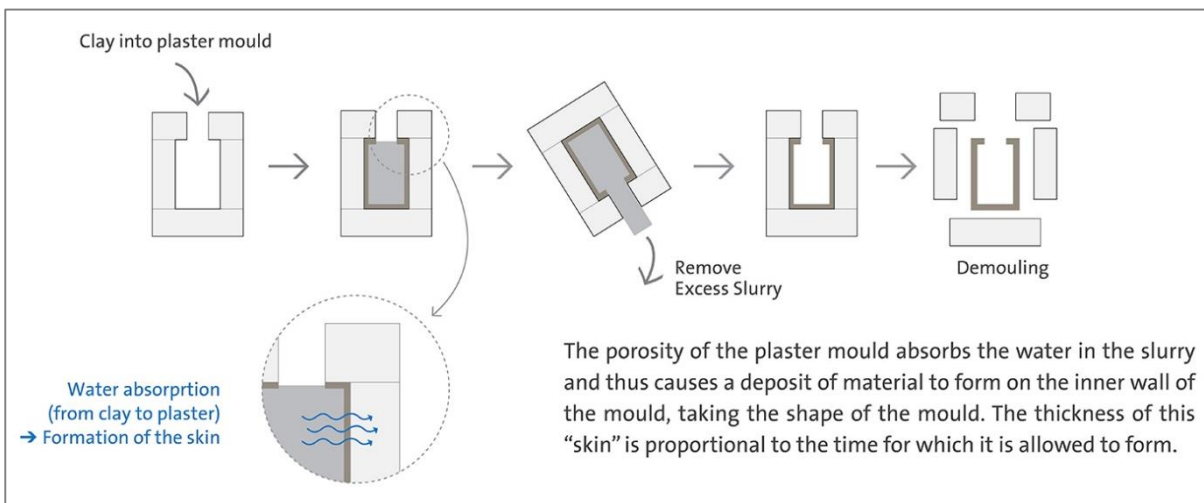


Figura 6 – Processo *Slip Casting* na indústria de cerâmica sanitária [16]

2.2 Fabrico Aditivo

O fabrico aditivo (FA), ou *additive manufacturing* (AM), é definido como processo de unir materiais para fazer objetos a partir de modelos CAD 3D, geralmente por deposição de camadas de material, em oposição às metodologias de fabrico subtrativas. As principais aplicações do FA são projeto, modelação, prototipagem de ajuste e função e produção de peças diretas. Este método de fabrico tem como principais vantagens a possibilidade de produzir geometrias

complexas impossíveis de obter por outras tecnologias, criar materiais compósitos, ser uma forma de fabrico livre e permitir economizar tempo e dinheiro [17, 18].

2.2.1 Contextualização histórica

O FA de peças, também conhecido por prototipagem rápida, surgiu a partir de 1980. O nome de prototipagem rápida visava o objetivo do processo que, inicialmente foi concebido para auxiliar a indústria na conceção de protótipos de forma rápida e de baixo custo [19].

A primeira patente reconhecida sobre estas tecnologias data de 1986 e refere-se ao processo de Estereolitografia (SLA) pertencente a Charles Hull, co-fundador da empresa *3D Systems*®. Em 1987, surgiu outra patente de Carl Deckard da Universidade do Texas, desta vez sobre Sinterização Seletiva por Laser (SLS). Dois anos depois, em 1989, Scott Crump, co-fundador da *Stratasys Inc.*® patenteou o processo de *Fused Deposition Modelling* (FDM) [19].

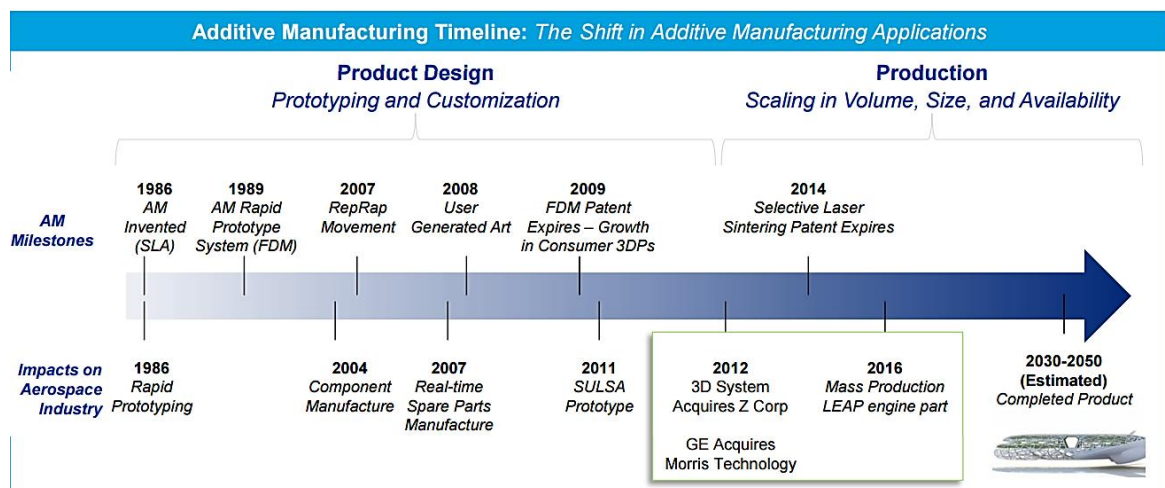


Figura 7 – Cronologia do FA [20]

Outras tecnologias foram emergindo nos anos seguintes como a *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), a *Ballistic Particle Manufacturing* (BPM) a *Laminated Object Manufacturing* (LOM) entre outras, crescendo também o número de empresas a comercializar máquinas de FA (Figura 7) [19].

Existem vários processos de FA, que podem ser divididos em 7 categorias segundo a norma ASTM F2792-12a (Tabela 6) [21].

Tabela 6 – Classificação ASTM dos processos de FA [21]

Categoria	Tecnologia
Vat photopolymerization	Estereolitografia
	Continuous liquid interface production
Material jetting	Liquid metal jet printing
	Thermojet
	Polyjet
Binder jetting	Powder bed 3D printing
	Impressão tridimensional
Material extrusion	Fused deposition molding
	Big area additive manufacturing
	Fused filament fabrication
Powder bed fusion	Selective laser sintering
	Selective laser melting
	Selective heat sintering
	Direct metal laser sintering
	Electron beam melting
Sheet lamination	Laminated object manufacturing
Directed energy deposition	Electron beam freeform fabrication

O FA apresenta uma grande variedade de aplicações, nomeadamente na indústria aeroespacial, automóvel, medicina, arquitetura e até para produtos domésticos. Em 2013, as empresas *3D Systems®*, *EOS®* e *Stratasys®* representavam quase 50 % das receitas em vendas do mercado do FA [20, 22].

A diversidade de materiais disponíveis (plásticos, compósitos, metais e cerâmicos) para processos de FA é também uma das razões para a grande potencialidade desta tecnologia. Para além disso, o processo permite conceber peças de geometrias e formas complexas, que são mesmo impossíveis de obter por outros processos.

As tecnologias de FA têm apresentado elevado crescimento nos últimos anos e a tendência mantém-se nas previsões futuras. No relatório da Wohlers Associates® de 2014, estima-se que a receita do fabrico aditivo possa ascender para 12,8 mil milhões de dólares em 2018. Esta tendência de crescimento pode ser observada na Figura 8. Esta expansão está a ser fortemente influenciada pela perspetiva de crescimento da conceção de produtos finais através de FA [18, 23].

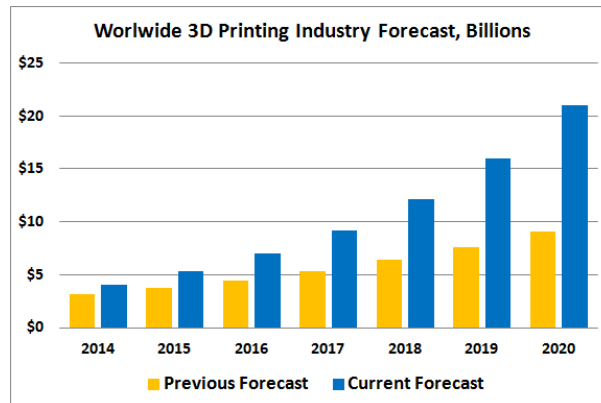


Figura 8 - Crescimento do FA [23]

2.2.2 Processos de FA para materiais cerâmicos

A produção de peças cerâmicas é possível a partir de diversas tecnologias de FA como estereolitografia, sinterização seletiva por laser e *fused deposition molding* (FDM), com as devidas adaptações ao material em questão. No entanto, as tecnologias com sistemas de fotopolimerização (Lithoz® e 3DCeram®) e processos *binder jetting* (ExOne®, Voxeljet® e 3D Systems®) são os mais usados para processamento de materiais cerâmicos [24, 25].

Para produzir peças cerâmicas tendo por base técnicas de extrusão, existem dois processos: *Extrusion Freeforming* (EFF) e *Fused Deposition of Ceramics* (FDC). Estes têm por base os princípios do processo FDM e permitem obtenção de peças complexas com propriedades mecânicas adequadas para a finalidade das peças [24].

Uma outra técnica já explorada no âmbito da deposição de pastas cerâmicas é o *RoboCasting* (RC). Este processo é usado para a produção de peças pequenas e consiste na extrusão de material por camadas, utilizado cerca de 50 a 65% de mistura de pós cerâmicos, até 1% de aditivos orgânicos e entre 35 a 50% de solvente (água) [24].

As técnicas de extrusão, também denominadas por *Solid Forming*, podem ser definidas como a criação de uma forma por adição pontual, linear ou planar de material sem superfícies confinantes, à exceção da base. Assim, os processos FDM, EFF, FDC e RC pertencem a este grupo de técnicas de extrusão e deposição de material [26].

No que diz respeito ao gesso, atualmente já estão disponíveis no mercado equipamentos de FA para este material. A 3D Systems [27] comercializa máquinas para processamento de gesso baseadas no processo binder jetting (Figura 9 a)) e a empresa EnvisionTEC [28] disponibiliza máquinas para fotopolimerização de gesso (estereolitografia) (Figura 9 b)). No entanto, para produzir moldes para peças de cerâmica sanitária (peças muito volumosas), estes sistemas de impressão 3D não são adequados, pois são bastante dispendiosos e limitados em termos de dimensões.



Figura 9 – Equipamentos FA de gesso: a) ProJet® x60 Series da 3D Systems [27]; b) Perfactory® 4 Digital Dental Printer Series da EnvisionTEC [28]

2.2.3 Fused Deposition Molding

A inspiração para a parte de FA do projeto ADIMAQ é o processo *Fused Deposition Molding* (FDM), pois pretende-se produzir moldações através da extrusão de pastas de gesso. Portanto o objetivo é usar os conhecimentos da tecnologia FDM já consolidada no caso dos materiais poliméricos e adaptá-la para as aplicações pretendidas neste projeto. Assim sendo, mostra-se relevante rever os princípios de funcionamento do processo FDM desenvolvido para polímeros.

O processo de FDM consiste na extrusão e deposição de material polimérico através de uma cabeça extrusora (Figura 10). A extrusão do material é efetuada a uma temperatura relativamente elevada para que o material se encontre num estado semissólido, sendo a deposição efetuada por camadas sucessivas de material e a união entre camadas ocorre aquando da solidificação do polímero usado [29, 30].

Neste processo são necessários suportes para a elaboração de saliências, furos, entalhes entre outros. Desta forma, muitas destas máquinas não apresentam apenas um orifício de extrusão, mas sim dois com o intuito de se extrudir material de suporte para estas partes das peças.

Enquanto os filamentos usados para a construção da peça podem variar entre o poliéster, polipropileno, ABS, elastómeros ou cera, o material de suporte é muitas vezes constituído por uma mistura de ABS e cal. Na Figura 10 mostra-se um esquema de funcionamento desta tecnologia [29, 30].

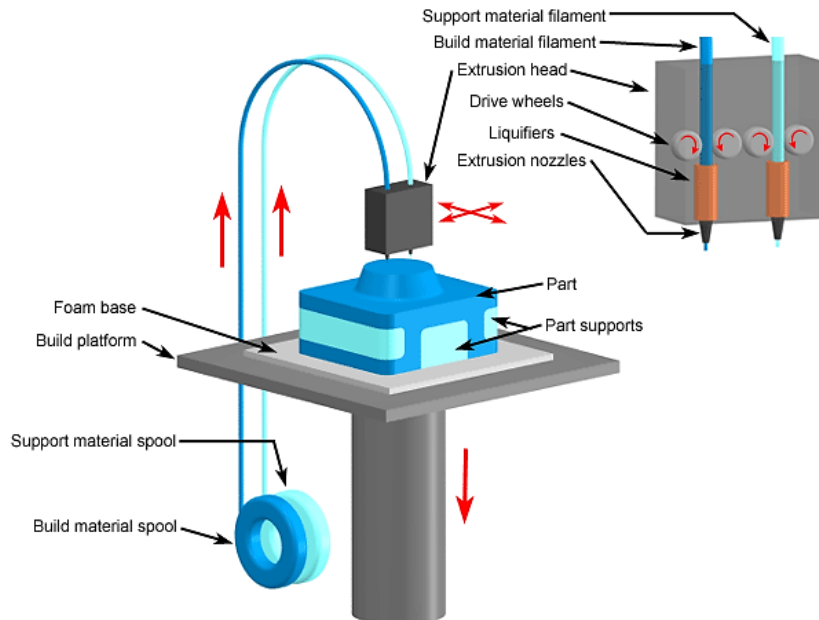


Figura 10 – Esquema de funcionamento de uma máquina de FDM para polímeros com dois bicos de extrusão [31]

Tal como em todas as tecnologias de FA, os equipamentos são complementados por *softwares* de CAD/CAM, sendo planeada previamente a trajetória dos vários bicos de extrusão, bem como quando a plataforma deve descer para dar início à deposição de uma nova secção da peça [29, 30].

Em FA o tempo de conceção das peças é por vezes um entrave, sobretudo em peças grandes ou de grande densidade de material. Uma das formas de diminuir o tempo de produção de uma peça é delinear um padrão de preenchimento já conhecido e devidamente calibrado para se poder aumentar as velocidades de extrusão, não perdendo precisão no processo [29].

As máquinas de FDM apresentam movimento em 3 eixos ortogonais, sendo o movimento na direção Z, perpendicular à plataforma de deposição, dado pelo movimento da própria plataforma ou até pelo próprio cabeçote de extrusão. O movimento no plano XY é assegurado pela cabeça extrusora [29, 30].

As cabeças de extrusão podem ser do tipo seringa. Este sistema não é dos mais utilizados devido a problemas de descontinuidade, sempre que o pequeno reservatório da seringa esvazia. São assim mais indicados para utilizações no âmbito experimental ou quando o material já se encontra no estado plastificado à temperatura ambiente. Existem duas formas típicas para

impulsionar o material nestes sistemas: por atuador linear que desloca o êmbolo da seringa (Figura 11 a)), ou por injeção de ar comprimido como fonte de pressão para a saída do material (Figura 11 b)) [29].

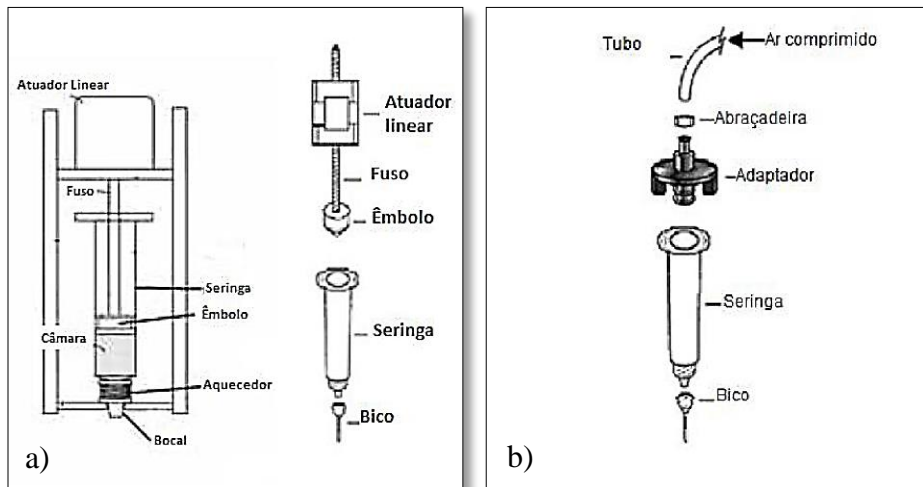


Figura 11 - Esquema de funcionamento e constituição de uma cabeça de extrusão tipo seringa: a) por atuador linear; b) por atuação de ar comprimido [29]

A situação mais comum é incorporar sistemas de fornecimento de material contínuo. Se o material se encontrar no estado plastificado à temperatura de operação, pode-se fazer o bombeamento do mesmo de um reservatório para o cabeçote de extrusão. No entanto, a maior parte dos materiais não corroboram esta premissa, sendo normalmente utilizados sobre a forma de *pellets*, grânulos, pó ou bobines com filamentos [29].

Se a forma de fornecimento dos materiais por em *pellets*, pó ou grânulos, o mais vulgar é utilizar-se extrusoras de rosca (Figura 12). Existem vários tipos de extrusoras de rosca, mas todas elas apresentam a função de guiamento e mistura e aquecimento do material até à sua plastificação. No caso da alimentação se realizar sobre a forma de filamento, um atuador linear força o deslocamento do mesmo através do bico de extrusão [29].

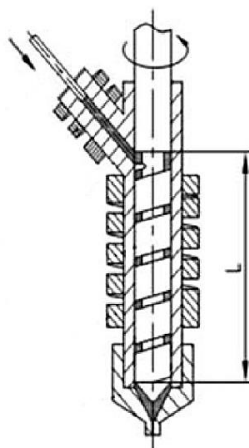


Figura 12 - Esquema de funcionamento e constituição de uma cabeça de extrusão de rosca [29]

Outro aspeto a ter em conta é a forma do bico de extrusão. Devido aos efeitos da viscoelasticidade e a um relaxamento de tensões após extrusão, a forma do material extrudido não é exatamente aquela que se observa no bico da extrusora. Na verdade, a forma final do material extrudido depende da forma da matriz, da pressão, da temperatura do material entre outros [29].

2.2.4 Processos FA de grandes dimensões

O projeto ADIMAQ tem como objetivo a construção de uma máquina de fabrico híbrido para produção de moldações de grandes dimensões, com volume de construção de aproximadamente 3x2x1 m. Deste modo, importa conhecer tecnologias de FA para obtenção de peças de grandes dimensões, mesmo não sendo para materiais cerâmicos.

O BAAM (*Big Area Additive Manufacturing*) é um projeto da *Cincinnati Incorporated®*, em colaboração com o ORNL (*Oak Ridge National Laboratory*). Este projeto visa a criação de uma máquina de FA para peças de grande envergadura, tendo como meta aumentar o volume de área de construção das máquinas existentes no mercado, juntamente com um aumento da velocidade de construção [32].

Esta tecnologia é baseada nos princípios do FDM e permite extrusão de materiais poliméricos até um caudal de cerca de 16 kg/h em volumes desde 2,4x2,4x2,4m. Utiliza *pellets* como forma de abastecimento do cabeçote de extrusão, em vez de bobinas de filamentos de material como no FDM. Esta pequena modificação permite reduzir o custo associado aos materiais nesta tecnologia [32].

Uma das aplicações mais sonante do BAAM foi a impressão do corpo de um carro denominado de *Shelby Cobra* (Figura 13 a)). Produzido à base de ABS reforçado com fibra de carbono, esta réplica à escala real consegue ser impressa em cerca de 12h. Para além do *Shelby Cobra*, já foram impressos outros corpos de carros como o *Strati Car* e o *PUV* (Figura 13 c)), bem como *kayaks* (Figura 13 d)), mesas, cadeiras, *spacecrafts*, e até módulos de edifício (Figura 13 b)) em termoplástico perfeitamente funcionais [33].

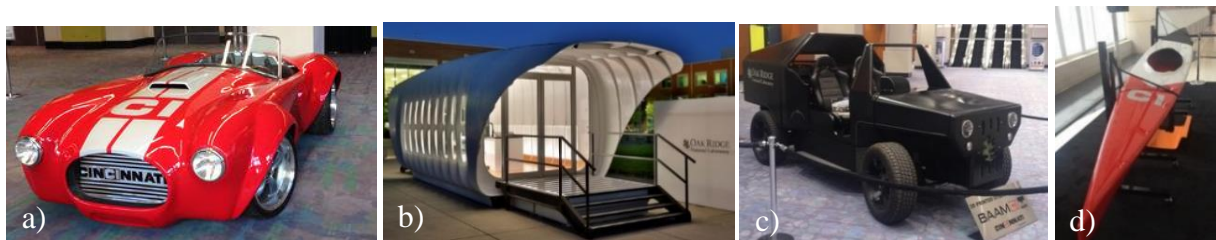


Figura 13 - Exemplos de aplicações do BAAM: a) *Shelby Cobra*; b) módulo de edifício; c) PUV; d) *kayak* [33]

O volume de construção e a rapidez do processo BAAM pode ainda ser conciliada com outras tecnologias podendo-se abrir novas oportunidades de negócio. A utilização de tecnologias híbridas com a BAAM pode, por exemplo, tornar possível o fabrico de carros personalizados no espaço de uma semana [19].

O processo *Contour Crafting*, desenvolvido e patenteado pela Universidade da Califórnia do Sul, consiste numa tecnologia de extrusão que usa capacidades de controlo computacionais para produzir peças com faces planas recorrendo a espátulas. Este processo de FA destaca-se pela velocidade, variedades de materiais (desde termoplásticos a alguns cerâmicos) e inexistência de limites dimensionais. A Figura 14 mostra a “impressão 3D” de uma casa, exemplo de uma aplicação de grande escala possível com a tecnologia *Contour Crafting* [24].

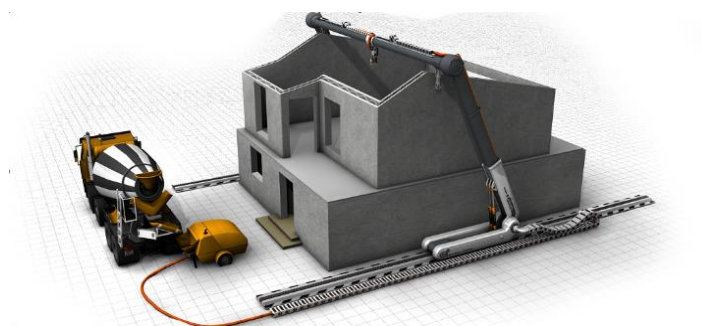


Figura 14 - Conceito de “impressão 3D” para edifícios pelo processo *Contour Crafting* [34]

Os resultados obtidos neste processo em termos de acabamento superficial são de qualidade muito reduzida. A eventual aplicação deste tipo de tecnologia na produção de moldações, exigiria um pós-processamento das peças para se alcançar a qualidade superficial exigida. Certamente seriam necessárias operações de maquinagem para eliminar saliências ou defeitos de forma resultantes do processo de FA. O projeto ADIMAQ enquadra-se neste tipo de soluções, com o objetivo de concretizar uma máquina de fabrico híbrido que alie o fabrico aditivo ao subtrativo [24].

Neste processo é possível combinar diferentes espátulas e bicos extrusores para conseguir melhores resultados. A existência de uma espátula lateral (Figura 15), que pode variar a inclinação, permite bom acabamento superficial das paredes. Ainda, o movimento de rotação da cabeça extrusora permite obtenção de peças de geometria mais complexa [24].

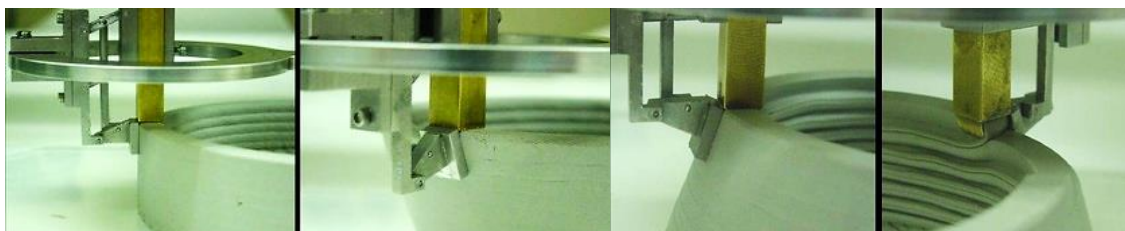


Figura 15 – *Contour Crafting*, evidência de espátula lateral com inclinação variável (adaptado de [34])

Desta forma, o *Contour Crafting* pode servir de inspiração à produção por FA de forma rápida, de moldações e modelos para moldes de fundição de grandes dimensões, nomeadamente na área náutica e aeroespacial. Uma lâmina de uma turbina, por exemplo, que envolva dimensões de 8x8x5 polegadas pode ser produzida em menos de 30 minutos, em vez das 7 horas que demora através de FDM [24].

2.3 Maquinagem

2.3.1 Introdução

A maquinagem é um processo de fabrico que se insere na categoria dos processos subtrativos, isto é, consiste na remoção de material de um bloco/peça, através de uma ferramenta de corte, até se obter a forma pretendida. Existem várias operações de maquinagem, nomeadamente torneamento, fresagem, furação, retificação, entre outras. Este processo de fabrico apresenta como principais vantagens a grande variedade de materiais disponíveis e de formas possíveis, bem como, a elevada precisão dimensional e acabamento superficial das peças produzidas. Por outro lado, destaca-se o desperdício de material e o elevado consumo de tempo como desvantagens, relativamente a outros processos de fabrico [35, 36].

O corte do material por meio de uma ferramenta de corte (Figura 16), impõe uma deformação plástica intensa que resulta na fratura do material e formação de avara. As ferramentas usadas dependem da operação de maquinagem que se pretende realizar e podem ter apenas uma aresta de corte ou várias [35, 36].

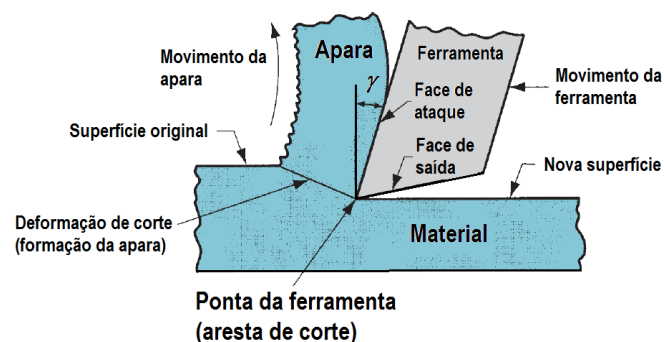


Figura 16 – Esquema representativo do processo de maquinagem por arranque de avara [35]

Para que haja remoção de material é necessário movimento entre a peça e a ferramenta. Assim, existem três movimentos essenciais na maquinagem: movimento de corte, movimento de avanço e penetramento. Estes movimentos são caracterizados por parâmetros de corte correspondentes: Velocidade de corte (V_c [m/s]), avanço (f [mm/min]) e profundidade de corte

(a_p [mm]). A taxa de remoção de material pode ser determinada pelo produto dos três parâmetros anteriores para ferramentas unifilares. Importa referir que os parâmetros de corte devem ser interpretados consoante o processo de maquinagem em questão [35, 36].

As operações de corte podem ser divididas em operações de desbaste e acabamento. As de desbaste usam-se para remoção de grandes quantidades de material, geralmente com velocidades de corte baixas, mas avanços e profundidades de corte elevados. As operações de acabamento usam-se para finalizar as peças, conferindo-lhes as dimensões, tolerâncias e acabamentos superficiais exigidos pela função à qual a peça se destina. Neste caso, são geralmente usadas velocidades de corte mais elevadas e avanços e profundidades de corte reduzidos [35, 36].

Dependendo do material a maquinar, dos parâmetros de corte seleccionados e da ferramenta, o tipo de apara resultante pode variar. A apara pode ser contínua, contínua com apara aderente, serrilhada (semi-contínua) e descontínua [35, 36].

A interação entre a ferramenta e o material gera esforços de corte durante as operações de maquinagem que podem surgir entre a ferramenta-apara e peça-apara. As forças de corte podem também reduzir-se à ferramenta de corte (Figura 17) [35, 36].

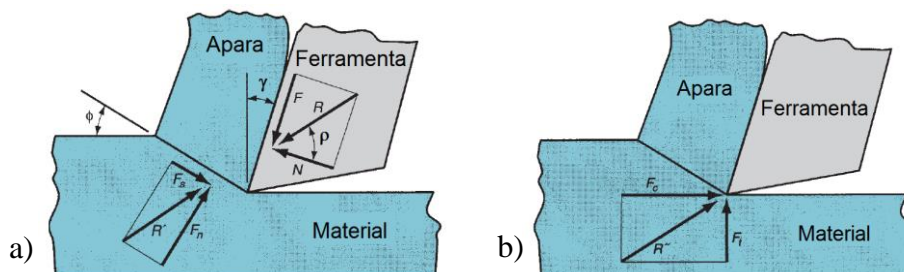


Figura 17 – Esquema representativo das forças de corte: a) forças ferramenta-apara e forças peça-apara; b) forças que atuam na ferramenta [35]

Importa referir que mais de 90% da energia despendida num processo de maquinagem de materiais metálicos é convertida em calor. Isto provoca um aumento significativo da temperatura na interface ferramenta-apara. As elevadas temperaturas envolvidas no processo têm como principal consequência a redução do tempo de vida das ferramentas [35, 36].

2.3.2 Ferramentas de corte

As ferramentas de corte podem ser monofilares (uma aresta de corte) ou multifilares (várias arestas de corte). As multifilares podem ser tratadas como várias monofilares considerando adaptações. Existem vários aspetos a ter conta sobre a geometria da ferramenta: arestas de corte,

planos da ferramenta, planos de referência, raio de ponta e ângulos da ferramenta (ângulo de saída, de ataque e de gume), forma e orientação das arestas de corte, espessura e controle da apara (relacionada com os ângulos de posição da aresta), entre outros. As ferramentas de corte podem ser de corpo único ou podem incluir insertos, correntemente designados por pastilhas de corte, sendo que a sua geometria influencia as condições de corte. Todos estes fatores afetam de algum modo o resultado final da maquinagem, por isso importa escolher cuidadosamente as ferramentas para o tipo de operação a executar e material a maquinar [35, 36].

As ferramentas de corte necessárias para o processo de maquinagem requerem grande resistência ao desgaste, elevada dureza a frio e a quente, elevada tenacidade, especialmente em corte interrompido, e condutividade térmica. Por outro lado, devem apresentar baixo coeficiente de atrito e baixo coeficiente de dilatação térmica. Deste modo, existe um conjunto de materiais para ferramentas que cumpre estes requisitos: aços rápidos, ligas fundidas, carbonetos sinterizados, *cermets*, cerâmicos e ultra duros. Os materiais mencionados estão ordenados por dureza e resistência ao desgaste crescentes e tenacidade decrescente. Na Tabela 7 são apresentadas algumas propriedades mecânicas e físicas de materiais para ferramentas [35, 36].

Tabela 7 - Propriedades mecânicas e físicas de materiais para ferramentas [36]

Material		Dureza HV 10/30	Tensão de rotura transversal (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coeficiente de dilatação térmica ($\times 10^{-6}/K$)	Conduct. térmica (W/m.K)
Aço rápido		700-900	2500-4000	268-300	9-12	15-48
Carbonetos		1200-1800	1300-3200	470-650	4,6-7,5	20-80
Cerâmicos	Si ₃ N ₄	1350-1600	600-900	280-320	3-3,3	20-35
	SIALON	1350-1600	600-900	280-320	3-3,3	20-35
	Al ₂ O ₃	1450-2100	400-800	300-450	5,5-8	10-38
	Al ₂ O ₃ + TiC	1450-2100	400-800	300-450	5,5-8	10-38
Ultra duros	Nitreto de Boro cúbico (CBN)	3500-4000	500-800	≈ 680	≈ 4,9	≈ 100
	Diamante policristalino (PCD)	5000-6000	600-1100	≈ 840	≈ 1,5	≈ 550

Os principais problemas que ocorrem nas ferramentas durante a maquinagem são o desgaste, a falha por aquecimento excessivo e a fratura da ferramenta. O desgaste nas interfaces ferramenta/apara e ferramenta/peça pode estar associado a fenómenos de abrasão, adesão, difusão, reações químicas e/ou deformação plástica.

O desgaste das ferramentas (Figura 18) pode ocorrer de várias formas, sendo que os principais tipos são o desgaste de flanco (ou frontal), desgaste de entalhe e desgaste de cratera. Para além destes, pode também ocorrer desgaste sob a forma de deformação plástica da aresta de corte, lascamento, fissuras e aparecimento de aresta postiça [35, 36].

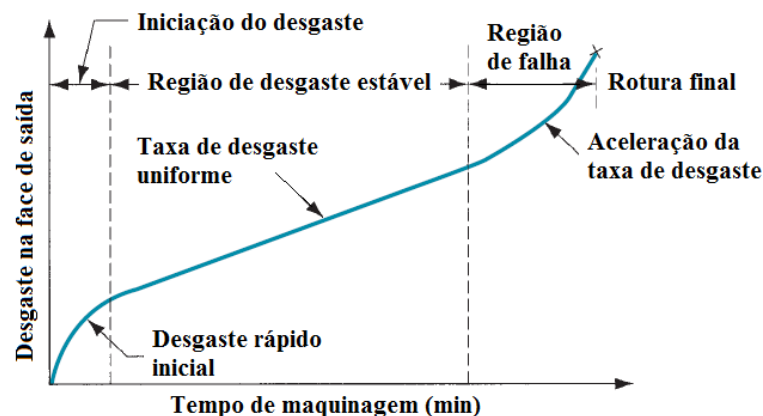


Figura 18 - Evolução do desgaste na face de saída da ferramenta (adaptado de [35])

A relação de Taylor permite antecipar o tempo de vida de uma ferramenta a partir da velocidade de corte. A possibilidade de determinar o tempo de vida da ferramenta minimiza eventuais problemas durante a maquinagem associados a fenómenos de desgaste. A relação de Taylor é dada pela equação (2.2).

$$V_c \cdot T^n = C \quad (2.2)$$

onde V_c é a velocidade de corte (m/min), T é o tempo de vida da ferramenta (min) e n e C são constantes. O valor n é uma constante relativa ao material da ferramenta, enquanto a constante C depende do material da ferramenta, do material de trabalho e das condições de corte. Traçando um gráfico da velocidade de corte em função do tempo de vida da ferramenta, n é dado pelo declive da linha e C resulta da interceção da linha com o eixo das velocidades [35].

2.3.3 Fresagem

No âmbito deste trabalho, serão realizadas essencialmente operações de fresagem em provetes de gesso. A fresagem é uma operação de maquinagem em que uma fresa, ou seja, uma ferramenta que pode ter forma cilíndrica, com uma ou múltiplas arestas de corte, definidas por um conjunto de dentes que possibilitam a remoção de material através da conjugação de movimento de rotação, avanço e penetramentos. O eixo de rotação da ferramenta de corte é perpendicular à direção de avanço. Existem dois tipos de fresagem base, a fresagem cilíndrica ou tangencial ou periférica (Figura 19 a)) e a fresagem frontal ou de topo (Figura 19 b)) [35].

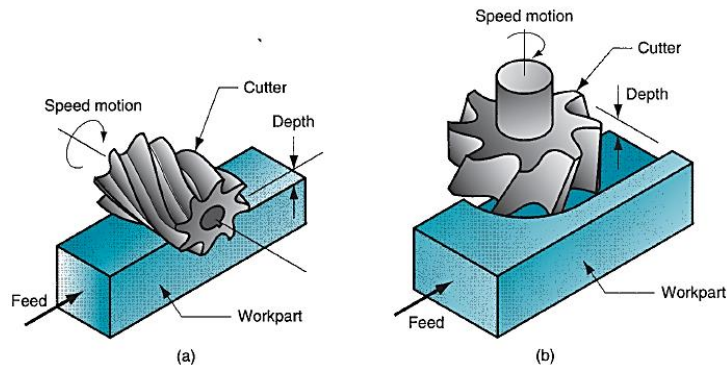


Figura 19 – Diferentes processos de fresagem: a) tangencial ou cilíndrica ou periférica; b) de topo ou frontal [35]

De seguida apresenta-se um quadro resumo (Tabela 8) com as expressões correspondentes aos parâmetros de corte referentes a operações de fresagem.

Tabela 8 – Quadro resumos de parâmetros de corte

Velocidade de corte [m/min]	$V_c = \frac{\pi D_c n}{1000}$	(2.3)
Frequência de rotação [rpm]	$n = \frac{1000 V_c}{\pi D_c}$	(2.4)
Avanço [mm/rpm]	$f = \frac{V_f}{n}$	(2.5)
Avanço por dente [mm/dente]	$f_z = \frac{V_f}{n z}$	(2.6)
Velocidade de avanço [mm/min]	$V_f = n z f_z$	(2.7)
Penetramento de trabalho [mm]	a_e	
Profundidade de corte [mm]	a_p	
Taxa de remoção de material [cm ³ /min]	$Q = a_p a_e V_f$	(2.8)
Tempo de maquinagem [min]	$T_c = \frac{L}{V_f}$	(2.9)

2.3.4 Maquinagem de gesso

A maquinagem de gesso é um tema ainda pouco explorado a nível científico. No entanto, já foram detetadas algumas dificuldades quanto à maquinagem de gesso para moldes ou moldações [14], nomeadamente:

- Teor de humidade no gesso - teor de humidade elevado torna o material impossível de maquinar (consistência pastosa); teor de humidade reduzido torna o material bastante frágil;
- Proteção da máquina - é necessário sistema de sopragem e/ou aspiração do pó de gesso (apara) que se forma durante a maquinagem, para evitar acumulação na superfície de corte, aquecimento da ferramenta e danos elétricos, mecânicos ou eletrónicos;
- Qualidade do material - blocos devem ser bem compactados de modo a evitar porosidades, que possam dar origem a orifícios ou fraturas durante a maquinagem;
- Desgaste da ferramenta de corte - deve-se utilizar sempre ferramentas adequadas ao material de modo a maximizar o tempo de vida da ferramenta e evitar danos ou destruição dos moldes ou moldações;
- Estratégia de maquinagem - deve-se ter em conta que se está a maquinar um material frágil que pode facilmente fraturar;
- Limitação da tecnologia - a maquinagem de geometrias complexas com detalhes profundos está limitada pela área de trabalho, comprimento útil da ferramenta e atravancamento da árvore da máquina.

Para além destes fatores, existem outros aspetos importantes a ter em conta no desenvolvimento de um equipamento industrial de grandes dimensões, como a eficiência energética e a gestão ambiental e de resíduos [14].

2.3.5 Tecnologias de maquinagem CNC para moldes de gesso

A nova abordagem para processos de produção de cerâmica centra-se na utilização de sistemas CAD/CAM, máquinas CNC e tecnologias FA. A maquinagem CNC (Figura 20) atua principalmente na fase de acabamento dos modelos ou moldes, através de fresadoras e robots [37].

Estudos incidiram sobre três tipos de tecnologias de maquinagem avançadas: maquinagem de 5 eixos, maquinagem de alta velocidade e maquinagem robotizada. A maquinagem de 5 eixos, pode reduzir significativamente a rugosidade superficial da peça e o tempo de maquinagem. A maquinagem de alta velocidade (HSM) funciona com elevada velocidade de

corte e de avanço. Esta apresenta problemas quanto ao desgaste das ferramentas, no entanto carece de investigação no âmbito da maquinagem de gesso. Contudo, certamente pode aumentar bastante a taxa de remoção do material [37, 38].



Figura 20 – Maquinagem de gesso: centro de maquinagem CNC [39]

A maquinagem robotizada (Figura 21) apresenta vantagens relativas ao investimento inicial, sendo menor do que o investimento num centro de maquinagem CNC convencional, mas também a maior flexibilidade que permite um robot. Por outro lado, a principal desvantagem é a fraca rigidez estrutural do braço, o que limita a aplicação do robot quando se pretende elevada precisão dimensional ou qualidade superficial, em operações que envolvam esforços significativos ou velocidades de corte elevadas. A força que a ferramenta gera no braço robótico durante o corte é importante no processo. As variáveis que afetam a força de corte são a composição do material e tratamentos, os parâmetros do processo (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e as características da ferramenta (diâmetro, número de dentes e geometria) [38].



Figura 21 – Maquinagem de gesso: robot industrial [40]

Segundo Coole *et al.* [38], os resultados de maquinagem obtidos para o sistema robótico e centro de maquinagem CNC convencional são muito semelhantes quanto à qualidade superficial do gesso, mas o tempo de maquinagem é superior no sistema robótico. Por exemplo

foram obtidas rugosidades de 1,1 e 1,2 μm com tempo de maquinagem de 255 e 279 min, para CNC convencional e sistema robótico, respetivamente. O sistema robótico é boa solução para maquinagem de protótipos de grandes dimensões, uma vez que a indústria cerâmica não requer tolerâncias apertadas [37, 38].

De uma forma geral, os moldes de gesso permitem obtenção de bons acabamentos superficiais, com valores médios de rugosidade (RMS) entre 40 e 125, correspondendo a rugosidades médias aritméticas (Ra) entre 1 e 2 μm , aproximadamente. No entanto, as aplicações na indústria cerâmica não requerem tolerâncias tão apertadas, sendo que a rugosidade esperada pode estar compreendida entre 8 e 10 μm [41].

2.3.6 Influência do teor de humidade do gesso na maquinabilidade

O gesso é difícil de maquinar devido à sua fragilidade e uma das possíveis soluções para minimizar o problema é pulveriza-lo com água antes da maquinagem. Para além disso, a quantidade de água é crítica para as propriedades da maquinagem, porque se o gesso estiver demasiado húmido é impossível maquinar e em forma de pó é abrasivo e provoca desgaste na ferramenta. As possíveis causas do desgaste da ferramenta são o teor de humidade no gesso, a acumulação de pó de gesso à volta da ferramenta, o calor retido causado pelo pó removido em redor da ferramenta e/ou a natureza abrasiva do gesso em pó [11].

Um estudo da maquinagem do gesso contendo diferentes teores de humidade (ref. [11]) revelou que o tempo de secagem dos blocos e teor de humidade é determinado pelo peso, sendo que secagem de 95% requer 10-12 dias. Os testes efetuados para o gesso MOLDA 3 revelaram que 20% de humidade e 6h de secagem – tornam o material impossível maquinar, pois o material adere à ferramenta (apara aderente); para 8% humidade e 8 dias secagem – obteve-se o melhor resultado, com bom acabamento; para 0% humidade e 21 dias secagem – verificou-se que o material se torna frágil e promove elevado desgaste da ferramenta. Esta investigação permitiu perceber que a taxa de remoção do material aumenta significativamente com o aumento da velocidade de corte, que a velocidade de corte influencia pouco o desgaste da ferramenta e que é difícil remover o pó da área de corte, o que causa problemas na dissipação de calor através da ferramenta, aumentando o seu desgaste. Segundo Coole *et al.* [11], a razão ótima velocidade/avanço foi 2:1, sendo a ótima velocidade de corte para o gesso de 678 m min⁻¹ e, ainda, que o teor ótimo de humidade é 8% que resulta num desgaste da ferramenta de 0,1% por hora.

2.3.7 Desgaste da ferramenta na maquinagem de gesso

Através de estudos acerca do desgaste da ferramenta na maquinagem do gesso, aferiu-se que o desgaste da ferramenta verifica-se sobretudo no flanco e este é influenciado pela profundidade de corte da ferramenta (na direção perpendicular ao eixo da fresa). A análise do desgaste para ferramentas de diferentes materiais (Aços rápidos - HSS-E Co8, HSS-E revestido com TiCN, Carbonetos (K30F), Carbonetos revestidos com TiCN e com TiAlN) revelou que os revestimentos reduzem o desgaste da ferramenta. No entanto, os melhores resultados foram obtidos com ferramentas de carbonetos [42, 43].

Contudo, é de notar que para se verificar desgaste nas ferramentas, em alguns casos é necessário maquinar cerca de 25 mm de material (tempos de maquinagem da ordem dos 150 minutos). Isto verifica-se essencialmente para ferramentas de materiais revestidos, dependendo dos parâmetros de corte estabelecidos [42]. Deste modo pode-se concluir que, o desgaste das ferramentas de corte na maquinagem de gesso não é um fator limitador do processo. Isto é, o gesso é um material pouco abrasivo, quando comparado com areia por exemplo, por isso ferramentas convencionais de aços rápidos HSS são suficientes para o tipo de maquinagem em causa neste projeto.

Um modelo de previsão para o tempo de vida de uma ferramenta para maquinagem de gesso é dado pela equação (2.3):

$$T = C(V^l f^m a^n) \epsilon \quad (2.3)$$

onde T é o tempo de vida da ferramenta [min], V é a velocidade de corte [m/min], f é o avanço por dente [mm/dente.rotação], a é a profundidade de corte [mm], C, l, m e n são constantes e ϵ é um fator do erro [42, 43].

Nesta relação a velocidade de corte é apresentada como o fator de maior influência para a vida da ferramenta, verificando-se uma diminuição da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte. Contudo, o aumento do avanço por dente e a profundidade de corte também diminuem a vida da ferramenta. O máximo tempo de vida da ferramenta pode ser determinado para uma dada taxa de remoção de material, que é função das 3 variáveis de corte independentes (velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte) [42, 43].

De seguida apresenta-se um quadro resumo (Tabela 9) acerca dos desgastes para ferramentas de vários materiais, sendo que estes dados são referentes a publicações científicas sobre este tema.

Tabela 9 – Quadro resumo acerca dos desgastes para ferramentas de vários materiais em maquinagem de formulações de gesso

Artigo Científico	Material da ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Desgaste da ferramenta	
			Taxa desgaste / h	
<i>Excessive tool wear and moisture content in ceramic plaster machining [11]</i>	HSS com molibdénio	119 – 1074	0.01% (20% hum.) – 6.5% (0% hum.)	
			Desgaste no flanco (mm)	Tempo de maquinagem (min)
<i>The analysis of tool wear in the machining of plaster material prototypes [42]</i>	HSS-E Co8	157	0.44 – 1.09	
	HSS-E revestido com TiCN	157 – 314	0.21 – 1.11	
	Carbonetos (K30F)	251	0.05 – 0.11	50 - 150
	Carbonetos revestidos com TiCN	251	0.04 – 0.09	
	Carbonetos revestidos com TiAlN	251	0.02 – 0.08	
<i>Analysis of CNC machining technology in production of plaster moulds [37]</i>	HSS revestido com TiCN	~ 150 - 300	~ 0.4 – 0.8	-
<i>Development of a tool life prediction model for plaster machining [43]</i>	HSS		~ 0.6 – 1.1	
	HSS revestido com TiCN		~ 0.5 – 1	
	Carbonetos	~ 180 - 350	~ 0.1 – 0.2	50 - 150
	Carbonetos revestidos com TiCN		~ 0.1 – 0.2	
	Carbonetos revestidos com TiAlN		~ 0 – 0.1	

2.4 Equipamentos de fabrico híbridos

Com o projeto ADIMAQ espera-se projetar um equipamento de fabrico híbrido que combine tecnologias de fabrico aditivo com maquinagem de 5-eixos numa unidade única de produção, com volume útil de trabalho de aproximadamente 3x2x1 m. No mercado existem atualmente equipamentos híbridos deste género, mas destinados ao processamento de materiais metálicos. Na Figura 22 apresentam-se dois equipamentos de fabrico híbrido, comercializados pela Hermle [44] e pela DMG MORI [45], respetivamente.

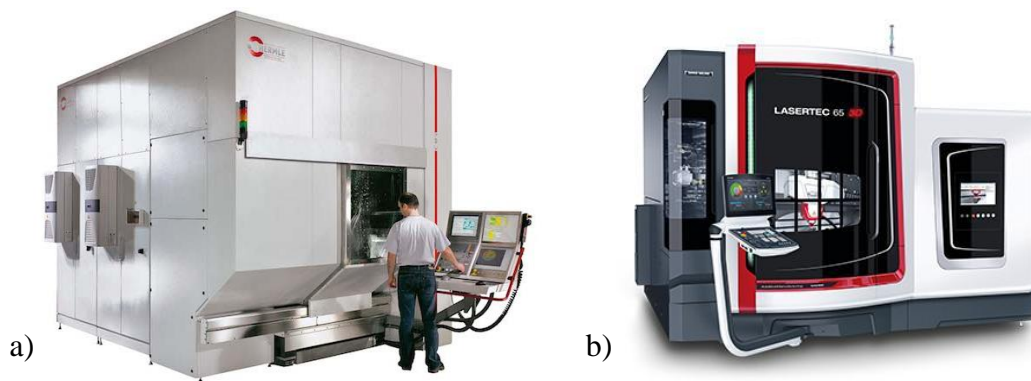


Figura 22 – Equipamentos híbridos: a) MPA da Hermle [44]; b) LASERTEC 65 3D da DMG MORI [45]

NX Hybrid Additive Manufacturing é o novo *software* da NXTM destinado a tecnologias de fabrico híbrido. Este foi desenvolvido para aplicação em tecnologia de fabrico aditivo (impressão 3D ou deposição de metal) com métodos subtrativos (maquinagem), mas destinado ao processamento de metais. Este tipo de tecnologia aliado a *software* adequado, possibilita a construção de geometrias complexas, incluindo cavidades internas, que posteriormente, são maquinadas para tolerâncias apertadas, permitindo criar novas classes de peças, fabricadas maior qualidade, rapidez e menores custos para pequenas séries [46].

A solução de fabrico híbrido da NX inclui um conjunto de capacidades em CAD (*Computer-Aided Design*) e fabrico assistido por computador (CAM) que permitem o desenvolvimento de programas para as novas máquinas híbridas da empresa DMG MORI (Figura 23 b)) [46].

Este *software* suporta etapas de fabrico aditivo e subtrativo em qualquer ordem. As operações de adição de material podem ser misturadas com operações de corte, de modo que a peça em processo deve ser capaz de representar tanto o novo material colocado pelos cabeçotes de adição, como o material removido cortado pelas ferramentas em operações de maquinagem (Figura 23) [46].

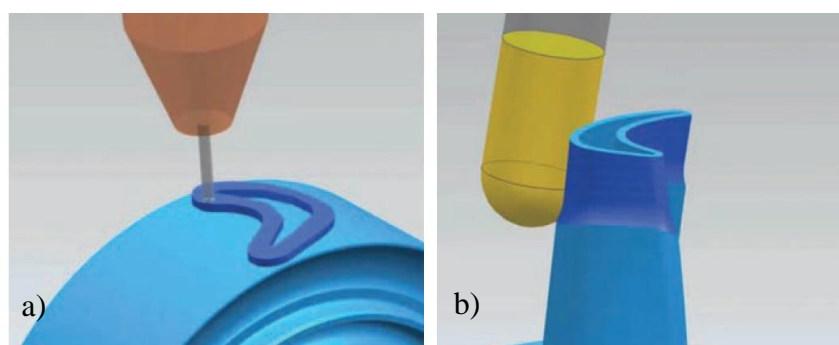


Figura 23 – *Software NX Hybrid Additive Manufacturing*: a) evidência de operações de adição; b) de subtração de material [46]

3 Técnicas e procedimentos experimentais

3.1 Produção dos provetes de gesso

Os provetes em gesso são produzidos através do vazamento de uma mistura de gesso e água num molde de silicone. Os provetes obtidos apresentam dimensões finais de 160x40x40 mm.

Para a produção dos provetes é necessário o seguinte material:

- Gesso β sem aditivos – Sival cerâmico extra;
- Água destilada;
- Recipiente para pesagem do gesso em pó;
- Copo graduado de 1 l;
- Balança;
- Misturadora;
- Molde de silicone;
- Espátula.

Os provetes são produzidos com uma mistura contendo uma relação gesso/água de 1,40 kg/l (especificação do fornecedor), através do procedimento descrito seguidamente, em sequência temporal:

- Determinação da proporção gesso/água;
- Pesagem do gesso em pó;
- Medição da quantidade de água através de um copo graduado;
- Adição do gesso à água, no recipiente da misturadora, ficando todo o pó submerso;
- Espera de 1 minuto, para que haja absorção de alguma água pelo gesso;
- Mistura da água e do gesso durante 2 minutos, numa misturadora até ficar uma mistura homogénea;
- Vazamento da mistura nos moldes de silicone;
- Remoção do excesso de gesso da parte superior dos moldes;
- Pesagem de molde com gesso;
- Espera de 15 minutos (tempo de endurecimento);
- Pesagem de molde com gesso;
- Espera de 15 minutos (tempo total de endurecimento: aprox. 28 minutos – indicado pelo fornecedor);
- Extração dos provetes dos moldes (cada molde contém 3 provetes);
- Pesagem de cada provete;
- Espera de 60 minutos (tempo em que estão a decorrer as reações químicas e o gesso aumenta a sua temperatura, pode chegar aos 60°C se provetes estiverem dentro do molde, só quando a temperatura dos provetes diminui é que estes podem ser colocados no forno);
- Pesagem de cada provete;
- Colocação de provetes no forno a 110°C ou deixar à temperatura ambiente de aproximadamente 20°C (temperatura controlada);

- Pesagem de cada provete diariamente até a variação de massa ser da ordem das centésimas de grama (considerado em equilíbrio) – no primeiro dia efetuar duas pesagens.

Importa salientar que a relação gesso/água usada na produção de provetes (1,40 kg/l) não é a mesma que é utilizada para a execução de peças através de fabrico aditivo baseado em extrusão de gesso (2,20 kg/L), no âmbito do projeto ADIMAQ. Tal não foi possível devido à consistência da pasta, bastante mais espessa e viscosa, que complicou o vazamento nos moldes de silicone comprometendo a qualidade dos provetes obtidos, sobretudo no que se refere à existência de porosidade. Foi também testado o vazamento com auxílio de uma placa vibratória, mas ainda assim os provetes resultantes revelaram-se de fraca qualidade devido à grande quantidade de poros resultantes de ar aprisionado no interior do material.

3.2 Ensaios de secagem

Com o objetivo de compreender o comportamento do gesso durante o seu processo de secagem, bem como a influência das temperaturas de secagem nas propriedades do material, foram realizados testes de secagem em gesso sem aditivos. Para tal, foram usados provetes de gesso (40x40x160mm), obtidos através de vazamento em molde de silicone (Figura 24). Um conjunto de provetes foi sujeito a secagem numa sala com ambiente controlado à temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, enquanto outro conjunto de provetes foi colocado num forno para secagem a 110°C . A formulação de gesso usada foi a mesma para todos os provetes (Sival Cerâmico extra - Relação gesso/água: 1,40 kg/l).



Figura 24 – Moldes de silicone para execução dos provetes de gesso

Importa salientar a diferença entre endurecimento e secagem do material. Tempo de endurecimento, ou tempo de presa, é o tempo necessário para que o gesso atinja o estado sólido a partir de uma mistura líquida ou pastosa. Este tempo é geralmente da ordem dos 15 – 30 minutos. A secagem do material consiste na perda de água do gesso até que este se encontre estável em termos de humidade, isto é, em equilíbrio com o ambiente envolvente e o seu teor

de humidade. O processo de secagem pode ser feito à temperatura ambiente ou através de um forno. O tempo de secagem demora vários dias, mesmo com auxílio de um forno com ventilação forçada.

Segundo a norma BS EN 12859:2011, um provete encontra-se com massa constante quando a variação de duas pesagens do mesmo distanciadas por 24 horas é inferior a 0,1% [4]. Assim, o controlo da secagem do gesso foi efetuado através de pesagens numa balança digital (precisão 0,01g). Cada bloco foi pesado logo após o vazamento e extração do material do molde. Depois, foram realizadas pesagens diariamente de todos os provetes até que estes verificassem uma variação de massa da ordem das centésimas de grama. Nesta fase, considerou-se que o material estaria seco, ou seja, a humidade contida no gesso estaria em equilíbrio com o ambiente ou atmosfera envolvente.

Seguidamente apresenta-se nas Figuras 25 e 26 a evolução da massa e consequente perda de água dos provetes de gesso ao longo do processo de secagem. De salientar que os provetes 1, 2 e 3 secaram à temperatura ambiente e os provetes 4, 5 e 6 secaram num forno a 110°C. O cálculo da percentagem de perda de água foi efetuado considerando que o peso médio dos blocos secos no forno corresponde ao teor de humidade nulo.

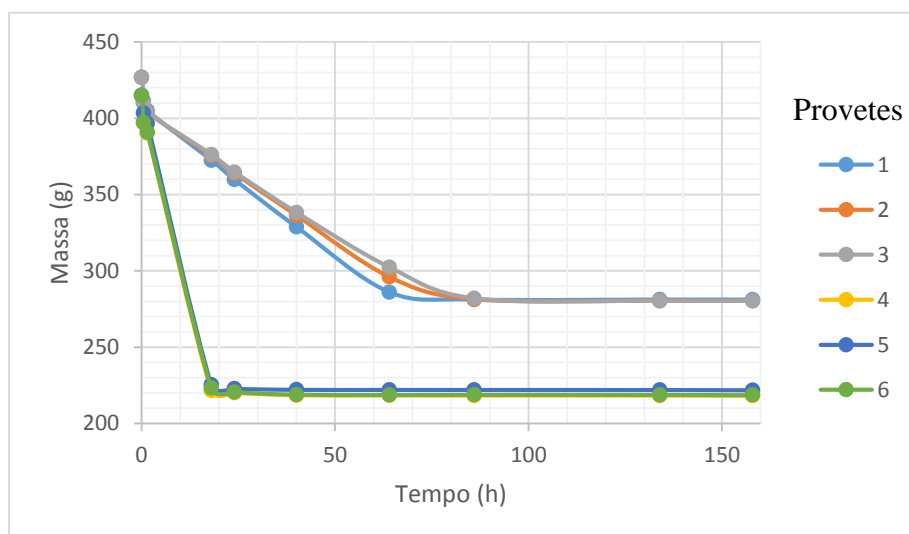


Figura 25 – Variação da massa dos provetes ao longo do tempo de secagem

Os provetes secos no forno a 110°C atingiram o equilíbrio em aproximadamente 2 dias, enquanto os blocos de gesso que secaram à temperatura ambiente necessitaram de cerca de 4 dias para atingirem o equilíbrio. Como seria de esperar, no forno a secagem do material é bem mais rápida do que à temperatura ambiente. A temperatura do forno foi escolhida de forma a maximizar o tempo útil para trabalho experimental. No entanto, o fornecedor do gesso não garante que as propriedades se mantenham acima dos 60°C.

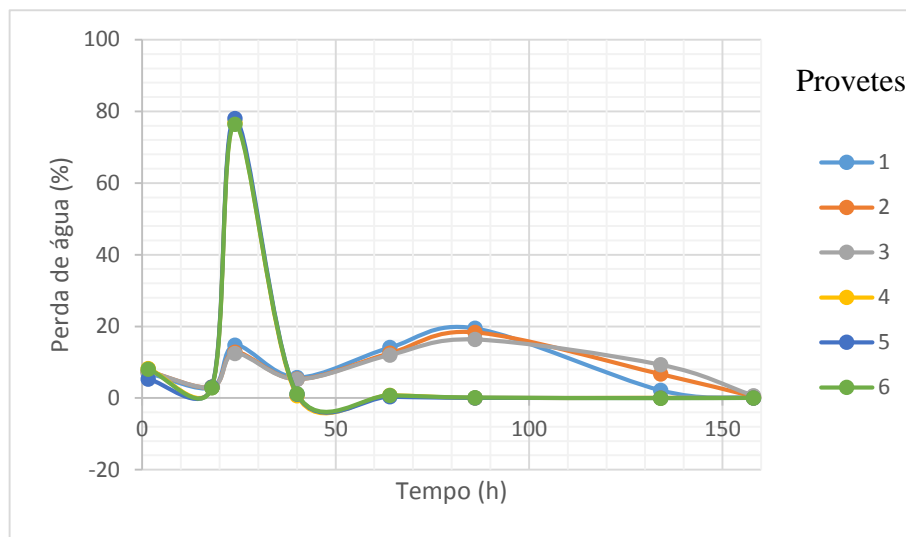


Figura 26 – Estimativa da perda de água (%) dos provetes ao longo do tempo de secagem

Para melhor se perceber o efeito da elevada temperatura no gesso, fez-se uma troca de provetes (Figura 27). Isto é, os provetes 1, 2 e 3, que secaram à temperatura ambiente, foram colocados no forno a 110°C e os provetes 4, 5 e 6, que secaram no forno com ventilação forçada, foram retirados e deixados à temperatura ambiente.

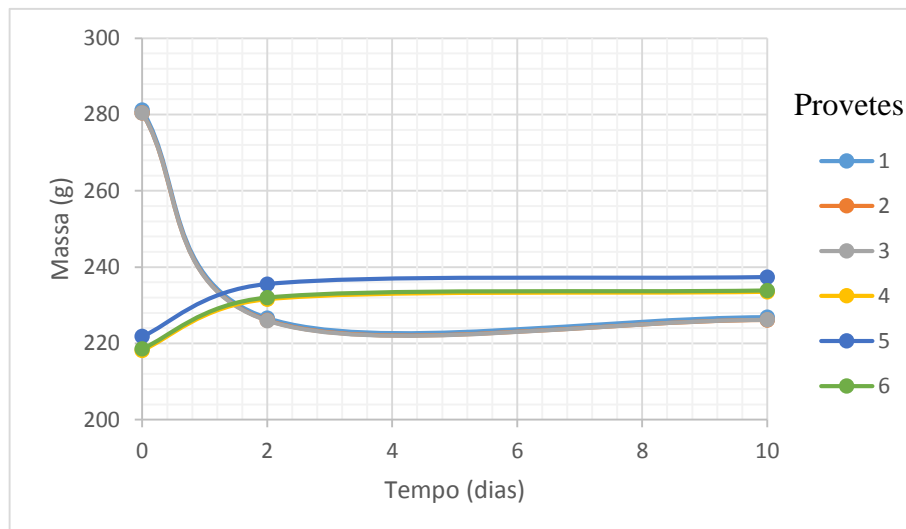


Figura 27 – Efeito da troca de provetes de ambiente de secagem na massa

Os provetes colocados no forno (1, 2 e 3) perderam cerca de 60 gramas e estabilizaram com cerca de 226g cada, valor um pouco superior à massa dos provetes que secaram no forno após o vazamento (cerca de 218g). Esta diferença pode estar relacionada com o facto da temperatura do forno escolhida ser 110°C, superior à temperatura de ebulição da água, o que levará à vaporização de grande parte da água na fase inicial da secagem (provetes em estado verde). O mesmo não ocorre quando o gesso colocado no forno já está seco e estável à temperatura ambiente.

Os provetes retirados do forno (4, 5 e 6) aumentam um pouco a sua massa quando deixados à temperatura ambiente. Tal demonstra a importância da interação do gesso com o meio ambiente, sendo um material em constante adaptação às condições envolventes.

Posto isto, dos ensaios de secagem concluiu-se que, os provetes sujeitos a secagem no forno a 110°C por um período igual ou superior a 2 dias, apresentam um teor de humidade de aproximadamente 0%. Os provetes sujeitos a secagem em ambiente laboratorial, de temperatura controlada de $20\pm 2^\circ\text{C}$, por um período igual ou superior a 4 dias, apresentam um teor de humidade de aproximadamente 20%. E, por último, os provetes sujeitos a secagem no forno a 110°C por um período igual ou superior a 2 dias, que posteriormente estabilizam em ambiente laboratorial, de temperatura controlada de $20\pm 2^\circ\text{C}$, apresentam um teor de humidade de aproximadamente 8%.

3.3 Controlo dimensional de provetes

Durante o estudo do processo de secagem do gesso fez-se o controlo dimensional dos provetes sujeitos a diferentes condições de secagem. Este ponto tem grande relevância na maquinagem do gesso, uma vez que em moldações de grandes dimensões a variação dimensional do material com a temperatura não pode ser significativa, para que o processo e a própria moldação sejam viáveis dentro das especificações pretendidas.

O controlo dimensional dos provetes foi realizado através da medição do comprimento dos provetes, com um paquímetro. As variações de comprimento registadas, desde o momento que os provetes foram retirados dos moldes de silicone até estabilizarem às condições de secagem a que ficaram sujeitos, foram da ordem dos 0,05 e 0,25 mm, para provetes secos em atmosfera normal e no forno a 110°C, respetivamente, o que corresponde a contrações máximas de cerca de 0,15%. Como era esperado, os provetes que registaram maiores contrações foram os sujeitos a secagem no forno a 110°C.

3.4 Operação de fresagem de topo

Os estudos de maquinagem do gesso serão baseados numa operação de fresagem de topo, que consiste na abertura de um canal longitudinal no provete (Figura 28). Para maximizar a utilização do provete, será maquinado um canal por cada face longitudinal do provete (4 faces) e em cada canal serão efetuadas três passagens da ferramenta de corte, constituindo três

repetições de cada ensaio (aplicação do mesmo conjunto de parâmetros de corte) para a avaliação da repetibilidade de resultados.

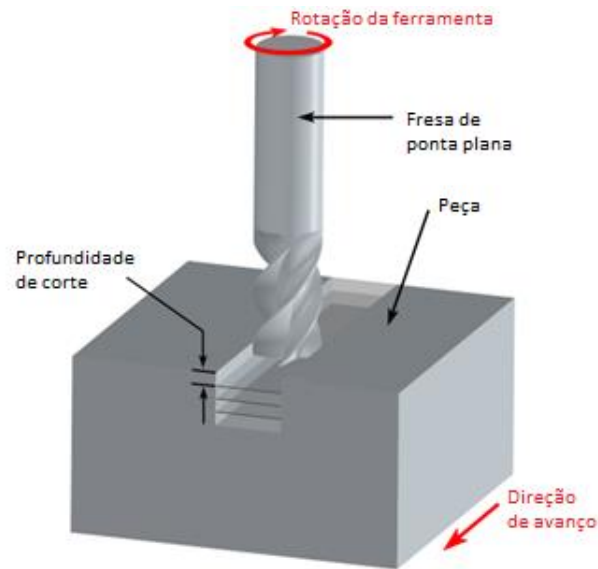


Figura 28 - Operação de fresagem de topo de um canal (adaptado de [47])

3.5 Máquinas

Para a maquinagem de provetes de gesso foram usadas duas máquinas distintas. Na primeira fase de ensaios foi usada a fresadora CNC Checkbox 1008, da OUPLAN CNC Routers (Figura 29), disponível no INEGI. Esta máquina possui uma mesa de corte com proteções laterais e com área de trabalho de 1100x850mm (X e Y) e 200mm de curso em Z. Trata-se de um equipamento de manuseamento fácil e de simples utilização. Esta máquina foi também utilizada para a realização dos ensaios complementares de maquinagem [48].



Figura 29 - Máquina CNC Checkbox, da OUPLAN CNC Routers [48]

Na Tabela 10 apresentam-se algumas características e especificações técnicas da máquina CNC Checkbox, da OUPLAN CNC Routers, disponível no INEGI.

Tabela 10 – Características da máquina CNC Checkbox, da OUPLAN CNC Routers [48]

Características Gerais	Especificações <i>Spindle</i>
Estrutura em alumínio	
Ponte em perfil de alumínio	
Velocidades até 25m/min	Troca manual:
Motor de corte troca manual 1,5kw - 24.000rpm - ER 32	Spindle 3,5kW - 24.000rpm - ER 32
Guiamentos em aço com patins de esferas	Spindle 7kW - 24.000rpm - ER 32
Transmissão por fusos nos eixos (X e Y)	
Mesa de grampos	Troca automática:
Controlador até 5 eixos	Spindle 3,5kW - 24.000rpm
Software CAD/CAM	Spindle 3kW - 50.000rpm
Sensor de medição de ferramenta	
Servo-motores	
Aspiração	

Nos ensaios preliminares de maquinagem e na segunda fase de ensaios (Método Taguchi) foi usada uma fresadora CNC de 5 eixos, da TECMACAL Industrial Solutions, disponível no INEGI (Figura 30). Esta possui sistema de sopragem e aspiração, para remoção do pó de gesso da zona de corte. A máquina tem uma mesa com sistema de vácuo que permitiu a fixação do bloco de gesso testado em ensaios preliminares.



Figura 30 – Fresadora CNC de 5 eixos [49]

Na Tabela 11 são apresentadas as especificações da fresadora CNC de 5 eixos, da TECMACAL Industrial Solutions, disponível no INEGI.

Tabela 11 – Especificações da fresadora CNC de 5 eixos, da TECMACAL Industrial Solutions [49]

Especificações Gerais		Especificações <i>Spindle</i>	
Cursos	2900x2050x1000	Potência máx. (kw)	7,4
Dimensões da mesa (mm)	3000x2000	RPM motor	24000
Velocidade máxima deslocação (m/s)	vX=1; vY=1; vZ=0,5	Binário máx. (N/m)	3,9
Aceleração máxima (mm/s ²)	aX=3; aY=3; aZ=2	Curso eixo C	+/- 225°
Lubrificação	Ar	Curso eixo A	+/- 100°
Fixação	Grampos	Velocidade máxima Eixo C	100°/s
Software	CNC Fagor		
Movimentação	Motor Servo	Velocidade máxima Eixo A	100°/s
Precisão	+/- 0,01		
Ferramenta	Fresa	Porta-ferramentas	ISO 30
Peso (Kg)	8000	Arrefecimento	Líquido
Área de Trabalho	2900x2050x1000		

3.6 Ferramentas

Para efetuar a maquinagem dos provetes foi necessário selecionar ferramentas adequadas, nomeadamente suporte e pastilhas. Como a operação de maquinagem a efetuar se trata de uma fresagem de topo, optou-se por uma fresa indicada para esta operação de haste cilíndrica (diâmetro 20mm): CoroMill R390-020A20-11M da *Sandvik* (Figura 31) de três pastilhas [50]. No Anexo B apresentam-se mais detalhes sobre a ferramenta.



Figura 31 – Fresa CoroMill R390-020A20-11M [50]

O gesso é um material de dureza bastante reduzida. As ferramentas de corte para maquinagem são geralmente projetadas para trabalhar metais, ou seja, materiais de dureza bastante superior à do gesso. Não existem no mercado ferramentas de corte indicadas para a maquinagem de gesso. No entanto, para maquinar este material foram escolhidas pastilhas de PCD (*Polycrystalline diamond*) para a primeira fase de ensaios - R390-11T304E-P4-NL CD10 (Figura 32 e Anexo C) [50].

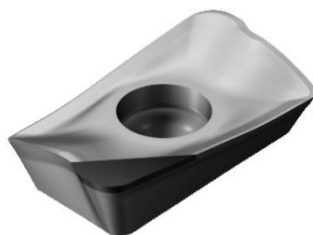


Figura 32 – Pastilha PCD - R390-11T304E-P4-NL CD1 [50]

Este é um material composto por partículas de diamante sinterizadas com um ligante metálico. Como o diamante é o material com maior dureza e, portanto, o mais resistente à abrasão, esta ferramenta de corte tem boa resistência ao desgaste. As pastilhas de PCD têm elevada estabilidade química a altas temperaturas, exceto para ligas ferrosas, onde se dissolvem facilmente [50].

Quanto às aplicações, a utilização de ferramentas PCD está limitada à maquinagem de materiais não-ferrosos, tais como alumínio com alto teor de silício, compósitos de matriz metálica (MMC) e plásticos reforçados com fibra de carbono (CFRP). As ferramentas PCD com refrigeração também podem ser usadas em aplicações de acabamento de titânio [50].

Na segunda fase de ensaios optou-se por usar pastilhas correntes, menos dispendiosas e de acessibilidade superior. As pastilhas usadas foram de WC (Metal duro) com revestimento de CVD - R390-11 T3 08M-MM S40T (Figura 33 e Anexo D) [50].



Figura 33 – Pastilha WC - R390-11 T3 08M-MM S40T [50]

Metal duro é um material composto por partículas de carboneto de tungstênio (WC) e um ligante rico em cobalto metálico (Co). A série S40T representa pastilhas de WC com

revestimento CVD¹. As coberturas CVD possuem alta resistência ao desgaste e excelente adesão ao metal duro. Estas pastilhas são ideais para fresagem em operações que exijam aços inoxidáveis muito tenazes; também é útil em operações com tendências abrasivas como, por exemplo, peças fundidas, aços inoxidáveis ferríticos/martensíticos [50].

3.6.1 Controle de desgaste da ferramenta

Para controlar o desgaste da ferramenta usada nos ensaios de maquinagem, fez-se a medição das dimensões das pastilhas de acordo com o esquema representado na Figura 34 (X_p e Y_p). Para tal, marcou-se previamente um ponto de referência em cada pastilha com um laser.

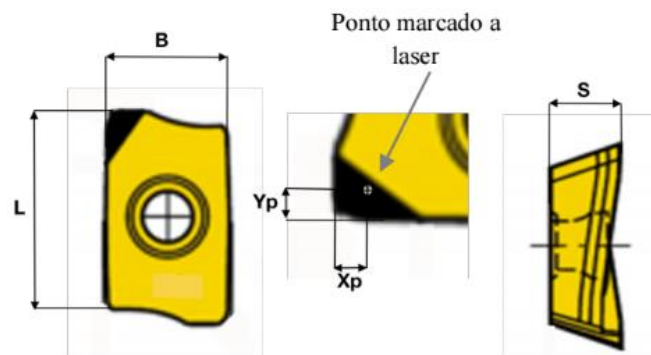


Figura 34 – Dimensões controladas nas pastilhas

As medições foram efetuadas num microscópio digital Mitutoyo (Figura 35), através de uma inspeção ótica utilizando um sistema de coordenadas. Cada medição foi realizada 5 vezes para minimizar possíveis erros.



Figura 35 – Microscópio *Mitutoyo*

¹ CVD significa Deposição por vapor químico.

3.7 Medição de esforços de maquinagem

A revisão bibliográfica acerca da maquinagem do gesso permitiu descobrir uma lacuna em termos de estudos quanto a esforços de maquinagem para este material. Deste modo, planearam-se ensaios de maquinagem instrumentados com uma célula de carga que permitisse a medição dos esforços de corte a que, quer o provete, quer a ferramenta são sujeitos durante a fresagem.

O contacto entre a ferramenta e a peça origina forças durante o processo de corte. As forças a medir durante a maquinagem do gesso correspondem às indicadas na Figura 36, F_x , F_y e F_z , força na direção perpendicular ao avanço, força na direção de avanço e força na direção da profundidade de corte, respetivamente.

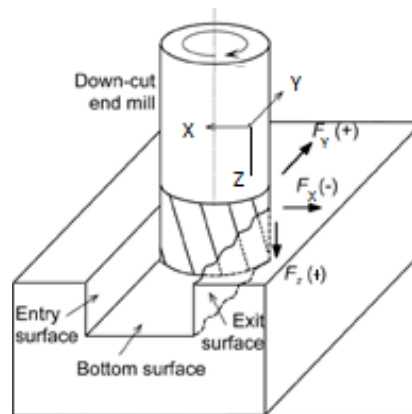


Figura 36 – Representação das forças de maquinagem (adaptado de [51])

3.7.1 Instrumentação

Um dinamómetro piezoelétrico, ou célula de carga, é um transdutor de força que permite medir os esforços a que um objeto está sujeito. Este instrumento transforma uma grandeza física, neste caso uma força, num sinal elétrico. Para medição das forças de maquinagem no gesso foi usado um dinamómetro piezoelétrico KISTLER 9257B (Figura 37, Anexo E). Este equipamento possui gama de medição entre -5 e 5 kN para forças segundo x, y e entre -10 e 10 kN para esforços segundo z.

A utilização de uma célula de carga para medição das forças implica a utilização de um sistema de amplificação de sinal e de um sistema de aquisição de dados.



Figura 37 – Célula de carga KISTLER 9257B

O amplificador de sinal tem como função converter os sinais elétricos (pC) fornecidos pela célula de carga em sinais proporcionais de tensão (V). Os dois aparelhos estão conectados através de um cabo próprio que permite a transmissão dos sinais elétricos para o amplificador. O amplificador de sinal usado foi KISTLER 5070A (Figura 38). Na interface do amplificador é possível definir vários parâmetros, como escalas, constantes de tempo, sensibilidade de cada canal, entre outros.

O sistema de aquisição de dados é constituído pelo equipamento HBM *Spider8*, conectado a um computador (Figura 38). Este sistema permite a receção dos dados vindos do amplificador, através do *software Catman*. Os sinais de variação das três forças (F_x , F_y e F_z) são representados graficamente em tempo real e é guardado um registo da variação das forças com o tempo de maquinagem, permitindo o posterior tratamento de resultados.



Figura 38 – Amplificador de sinal KISTLER 5070A, cabo de ligação entre célula de carga-amplificador e sistema de aquisição de dados HBM *Spider8* e computador

3.7.2 Tratamento de dados

Os dados resultantes da medição de esforços com a célula de carga resultam em gráficos de variação de forças em função do tempo. Como a leitura do sinal é iniciada antes da maquinagem do provete, os sinais resultantes apresentam variações de forças que ocorrem também em

momentos anteriores e posterior à operação de corte, como por exemplo variações consequentes de vibrações induzidas pelos deslocamentos rápidos do cabeçote da máquina (Figura 39).

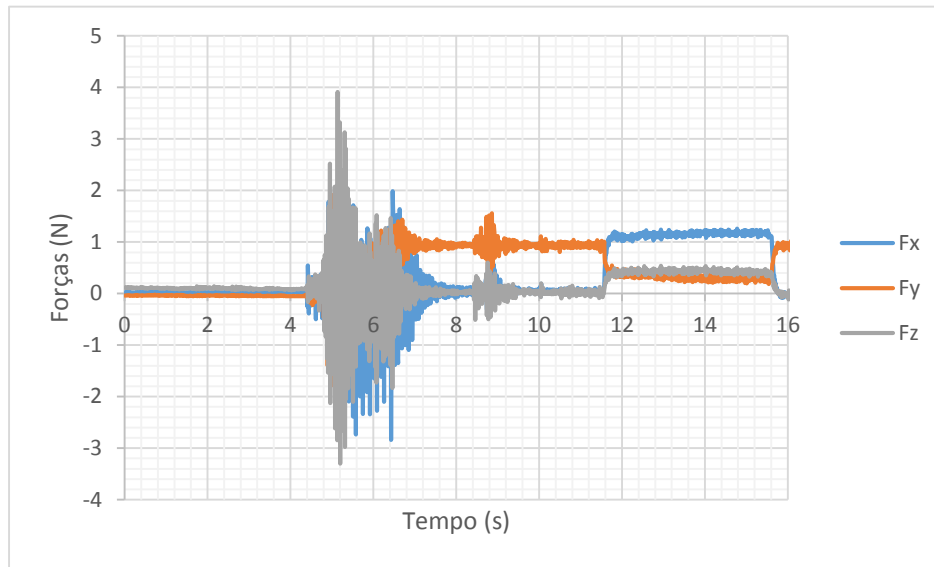


Figura 39 - Exemplo de sinal de variação das forças em função do tempo de maquinagem

As variações registadas no gráfico da Figura 39 de 4 a 7s correspondem ao deslocamento do cabeçote da máquina para a origem da peça e as variações que ocorrem de 12 a 16s, aproximadamente, é que correspondem à maquinagem do canal no provete. Apenas as forças que ocorrem durante a operação de fresagem interessam para a avaliação dos esforços, por isso é feito o tratamento de todos os sinais obtidos de forma a analisar apenas as variações de forças pretendidas.

3.8 Sistema de fixação

Como os provetes são de pequenas dimensões é necessário um sistema de fixação adequado para permitir a maquinagem dos canais. Deste modo, projetou-se um sistema de fixação à medida dos provetes constituído por barras aparafusadas na célula de carga (Figura 40). Para aperto dos provetes foram colocadas chapas entre os provetes e as barras de fixação e o aperto foi feito com três parafusos transversais colocados numas das barras laterais de fixação (Figura 41). Para fixar a célula de carga à mesa de trabalho da máquina CNC, foi necessário usar uma placa base. Os desenhos técnicos das barras de fixação e da placa base estão representados no Anexo F.

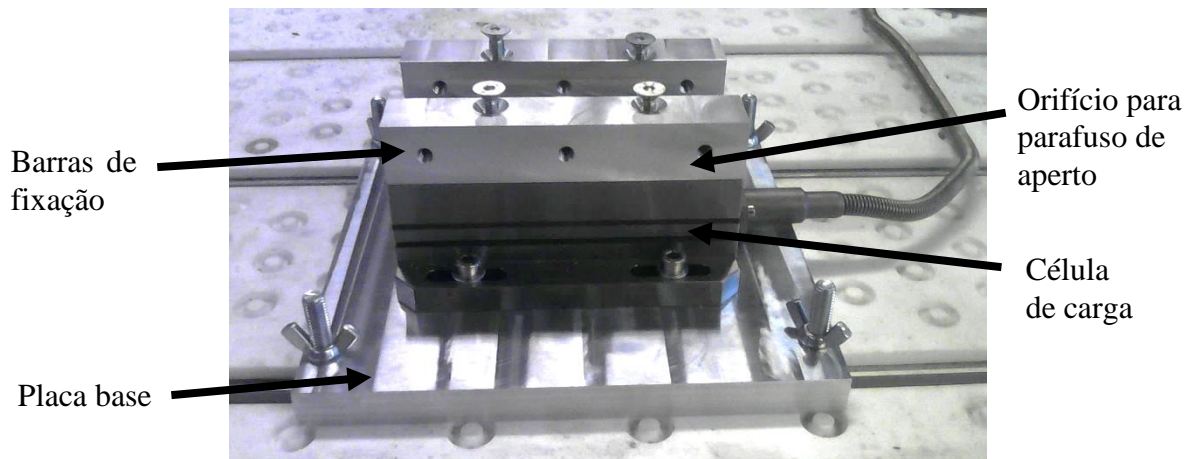


Figura 40 – Sistema de fixação de provetes e da célula de carga

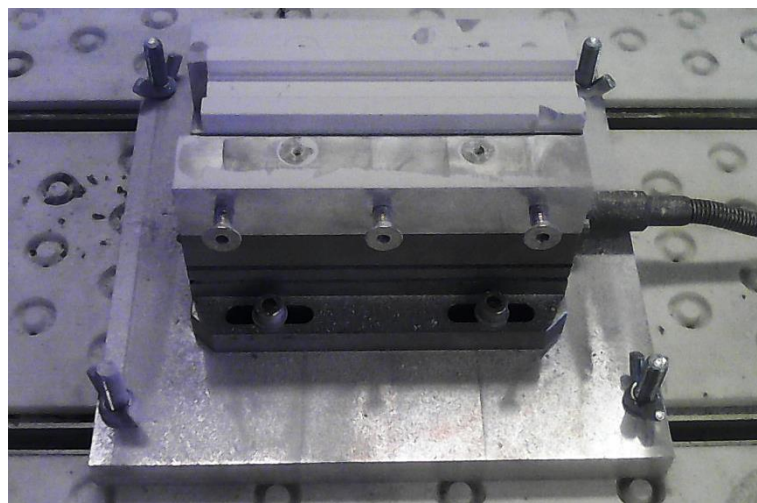


Figura 41 – Representação de provete fixo

3.9 Medição de rugosidades

Além da medição das forças de maquinagem, pretende-se medir as rugosidades das superfícies maquinadas para estudo da influência dos parâmetros de corte na qualidade do acabamento superficial. Desta forma, foi utilizado um rugosímetro portátil *Hommel Tester T500* (Figura 42). Este aparelho permite a medição de três parâmetros de rugosidade da superfície (R_a , R_z e R_{max}), segundo a norma DIN 4777. O rugosímetro usado é de classe de precisão 1, apresenta resolução máxima de $0,01\mu m$ e permite três comprimentos de avaliação distintos.

O desvio médio aritmético do perfil, R_a , é geralmente apenas designado por rugosidade. Esta é caracterizada pela média aritmética dos desvios do perfil real relativamente à linha média (linha que divide o perfil de forma que a soma das áreas do lado da matéria seja igual à soma das áreas do lado oco). A média das alturas máximas do perfil de rugosidade, R_z , resulta da medição em cinco

comprimentos de base consecutivos. E a máxima altura do perfil, R_{max} , é medida num dado comprimento de base [52].



Figura 42 - Rugosímetro portátil *Hommel Tester T500* [53]

No gesso foram efetuadas 3 medições de rugosidade após cada ensaio, através do posicionamento manual do rugosímetro sobre a superfície da base do canal maquinada, perpendicularmente às estrias de maquinagem, como recomendado. Os parâmetros de palpação usados foram 4,8mm de comprimento de avaliação (L_t) e 0,8mm de comprimento de base (L_c). No tratamento dos resultados foram calculadas as médias das três medições de rugosidades efetuadas em cada ensaio.

Como forma de verificação dos resultados obtidos nas medições de rugosidades ao longo dos testes de maquinagem, foi realizado um conjunto de medições extra com outro equipamento de medição não portátil. O equipamento usado foi um perfilómetro que utiliza o mesmo princípio de funcionamento do rugosímetro portátil *Hommel Tester T500*. No Anexo G apresentam-se as comparações entre as medições realizadas pelos dois equipamentos, não se tendo verificado diferenças significativas.

3.10 Plano de ensaios

Para melhor se compreender todo o plano de ensaios efetuado ao longo deste trabalho, apresenta-se em seguida um quadro resumo (Tabela 12) com algumas informações importantes relativas a cada série de ensaios, de forma a revelar o panorama geral do trabalho experimental desenvolvido.

Tabela 12 – Quadro resumo das séries de ensaios de maquinagem realizados

Séries de ensaios	Máquina	Ferramenta/ Pastilhas	Material	Objetivos
Ensaio Preliminares	CNC de 5 eixos	Fresa Ø20mm	Bloco de gesso de grandes dimensões	Definir gamas de parâmetros de corte a usar.
Primeira fase de ensaios	CNC Checkbox 1008	Fresa Ø20mm/PCD	Provetes em gesso (0, 8 e 20% de humidade)	Estudo da influência dos parâmetros de corte e do teor de humidade nos esforços de corte e na qualidade superficial.
Segunda fase de ensaios	CNC de 5 eixos	Fresa Ø20mm/WC	Provetes em gesso (verde e 20% de humidade)	Estudo da influência dos parâmetros de corte e do teor de humidade nos esforços de corte e na qualidade superficial.
Ensaio Complementares	CNC Checkbox 1008	Fresa Ø20mm/PCD	Provetes em gesso	Estudo de outras características do gesso sob maquinagem.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios preliminares de maquinagem (Anexo A) e considerando as gamas de parâmetros de corte reunidas na revisão bibliográfica, fez-se um refinamento dos parâmetros de corte usados para execução dos ensaios de maquinagem, em provetes de 40x40x160mm, com fresagem de um canal por face. Na Tabela 13 são apresentados os parâmetros de corte selecionados e na Tabela 14 é apresentada a matriz dos parâmetros de corte adotados na primeira fase de ensaios. Importa realçar que foram realizados ensaios de maquinagem preliminares num bloco de grandes dimensões na fresadora CNC de 5 eixos e, posteriormente, foram realizadas duas campanhas de ensaios (fase 1 e fase 2) com os provetes de pequenas dimensões produzidos especificamente para este estudo. Posteriormente ainda foram realizados ensaios adicionais que serão apresentados e discutidos no final deste estudo.

Tabela 13 – Gammas de parâmetros de corte seleccionados para a primeira fase de ensaios

Velocidade de corte, V_c (m/min)	150; 250; 350
Velocidade de avanço, f (mm/min)	2400; 4000; 5600
Profundidade de corte, a_p (mm)	0,5; 1; 2

Tabela 14 – Parâmetros de corte para primeira fase de ensaios

Ensaio	Velocidade de corte V_c (m/min)	Velocidade de avanço f (mm/min)	Profundidade de corte a_p (mm)
1	150	2400	0,5
2	150	4000	0,5
3	150	5600	0,5
4	150	2400	1
5	150	4000	1
6	150	5600	1
7	150	2400	2
8	150	4000	2
9	150	5600	2
10	250	2400	0,5
11	250	4000	0,5
12	250	5600	0,5
13	250	2400	1
14	250	4000	1
15	250	5600	1
16	250	2400	2
17	250	4000	2
18	250	5600	2
19	350	2400	0,5
20	350	4000	0,5
21	350	5600	0,5
22	350	2400	1
23	350	4000	1
24	350	5600	1
25	350	2400	2
26	350	4000	2
27	350	5600	2

Pretende-se que estes ensaios da 1ª fase sejam realizados em provetes com diferentes teores de humidade, ou seja, com tempos de secagem diferentes, nomeadamente 0, 8 e 20% de humidade. Humidade relativa de 0% corresponde a provetes em gesso sujeitos a secagem num forno a 110°C por um período maior ou igual a 2 dias. Humidade de 8% refere-se a provete

sujeitos a secagem no forno a 110°C e posterior estabilização em ambiente laboratorial, de temperatura controlada de 20±2°C. E por último, humidade de 20% é relativa a provetes que sofreram o processo de secagem à temperatura ambiente, nas condições laboratoriais, por um período igual ou superior a 4 dias, até estabilizarem a sua massa. É de salientar que a matriz de ensaios é repetida para cada teor de humidade de provetes e que para cada ensaio são realizadas três repetições, de forma a estudar a repetibilidade dos resultados experimentais, resultando num total de $27 \times 3 \times 3 = 243$ ensaios.

3.11 DoE Taguchi

Numa segunda fase de ensaios, depois de analisar os resultados da primeira campanha de ensaios, decidiu-se fazer um plano de ensaios com base no método Taguchi. O método Taguchi consiste num desenho de experiências que permite otimizar um produto ou processo para que funcione de forma mais consistente no ambiente operacional. Os fatores que causam variabilidade numa experiência não podem ser todos controlados. Esses fatores incontrolláveis são chamados de fatores de ruído. Nos planos de ensaios Taguchi pretende-se identificar fatores controláveis que minimizam o efeito dos fatores de ruído. Durante a atividade experimental, os fatores de ruído devem ser alterados para provocar variabilidade nos resultados. Posteriormente, é possível determinar valores ótimos para os fatores controláveis que minimizam os efeitos dos fatores de ruído nos resultados experimentais. Assim, um processo ou produto concebido com este objetivo produzirá resultados mais consistentes [54].

Nos planos de ensaios Taguchi usam-se matrizes ortogonais, que estimam os efeitos de fatores na média e variação da resposta. Uma matriz ortogonal permite que os níveis dos fatores sejam ponderados igualmente. Deste modo, cada fator pode ser avaliado independentemente de todos os outros fatores, para que o efeito de um fator não afete a estimativa de outro fator. As matrizes ortogonais centram-se essencialmente em efeitos principais [54].

Existem diversas matrizes possíveis para um plano de ensaios com o método Taguchi, conforme o número de variáveis que se pretenda estudar e as possíveis interações entre os parâmetros a estudar. Neste caso, o plano de ensaios foi projetado com base numa matriz L_{18} ($2^1 \times 3^7$) (Tabela 15), que consiste num plano de 18 ensaios e estudo de quatro parâmetros e da interação entre dois parâmetros, nomeadamente colunas 1 e 2 (Figura 43). A matriz L_{18} é uma matriz especial porque permite estudar a interação entre as colunas 1 e 2 sem sacrificar outras colunas (geralmente, são usadas colunas auxiliares para o cálculo das interações). De notar que a coluna 1 é de dois níveis e as restantes são de três níveis. Caso exista alguma interação entre

as colunas de três níveis (colunas 2, 3 e 4), o efeito é uniformemente distribuído pelas colunas, o que permite o estudo dos efeitos principais.

Tabela 15 – Matriz Taguchi $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ (adaptada)

Ensaio	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2



Figura 43 – Gráfico linear que representa as interações possíveis de analisar com matriz Taguchi $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ (adaptado)

Neste plano de ensaios será usada a seguinte correspondência de colunas: 1 – Humidade, h (%); 2 – Velocidade de corte, V_c (m/min); 3 – Velocidade de avanço, (mm/min); 4 – Profundidade de corte, a_p (mm). Deste modo, será estudada a interação entre os parâmetros humidade e velocidade de corte, pois na primeira fase de ensaios os resultados apontaram para que esta fosse a interação mais relevante. Importa referir que na segunda fase de ensaios optou-se por alargar a gama de parâmetros de corte em estudo, uma vez que os esforços de corte e as rugosidades obtidas nos resultados da primeira fase foram reduzidos. Assim, na Tabela 16 são apresentadas as gamas de parâmetros de corte seleccionadas para o plano de ensaios da segunda fase.

Tabela 16 – Gama de parâmetros de corte selecionados para a segunda fase de ensaios

Velocidade de corte, V_c (m/min)	150; 350; 700
Velocidade de avanço, f (mm/min)	2400; 5600; 11000
Profundidade de corte, a_p (mm)	0,5; 1; 2

Importa referir que no seguimento da primeira fase de ensaios optou-se por estudar o parâmetro da humidade tomando dois estados: 20% de humidade (provetes considerados estáveis/secos – secagem superior a 4 dias à temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$) e estado "verde" (provetes em fase de secagem - secagem de 1 dia à temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$). Esta escolha resultou de estudos de maquinagem em verde apresentados na Secção 4.5.1.

Na Tabela 17 é apresentado o plano de ensaios baseado no método Taguchi. De notar que para cada ensaio serão realizadas três repetições, tal como na primeira fase de ensaios.

Tabela 17 – Plano de ensaios Taguchi

Ensaio	Humidade h (%)	Velocidade de corte V_c (m/min)	Velocidade de avanço f (mm/min)	Profundidade de corte a_p (mm)
1	20	150	2400	0,5
2	20	150	5600	1
3	20	150	11000	2
4	20	350	2400	0,5
5	20	350	5600	1
6	20	350	11000	2
7	20	700	2400	1
8	20	700	5600	2
9	20	700	11000	0,5
10	verde	150	2400	2
11	verde	150	5600	0,5
12	verde	150	11000	1
13	verde	350	2400	1
14	verde	350	5600	2
15	verde	350	11000	0,5
16	verde	700	2400	2
17	verde	700	5600	0,5
18	verde	700	11000	1

4 Resultados e Discussão

4.1 Primeira fase de ensaios

Na primeira campanha de ensaios foram alvo de estudo os esforços/forças de corte nos provetes e a rugosidade da superfície maquinada, consoante os parâmetros de corte aplicados e do teor de humidade dos provetes testados. A análise de resultados foi realizada segundo dois métodos: análise de médias e desvios padrões dos resultados e análise estatística segundo método ANOVA. Deste modo, são apresentados de seguida os resultados relativos à primeira análise deste conjunto de ensaios de maquinagem (plano de ensaios na secção 3.10).

4.1.1 Forças de maquinagem - humidade 0%

Na Figura 44 apresentam-se os gráficos que representam resultados de forças de maquinagem para provetes em gesso testados com teor de humidade de 0%. Constata-se que as forças F_x e F_y (Figura 44 a) e c)) aumentam com a velocidade de avanço e com a profundidade de corte, sendo o efeito desta última mais acentuado. No entanto, o aumento da velocidade de corte provoca um decréscimo de ambas as forças, sendo mais notório em F_x . As forças F_x e F_y apresentam uma resposta à variação dos parâmetros de corte semelhante, mas a força de corte F_x mostra-se mais relevante por alcançar valores superiores, sendo o máximo da ordem dos 3,5N. No que diz respeito à força F_z , não se nota um padrão regular do aumento ou decréscimo da sua intensidade em função da variação dos parâmetros de corte. É de salientar que é uma força de baixa intensidade, sendo o seu máximo inferior a 1N.

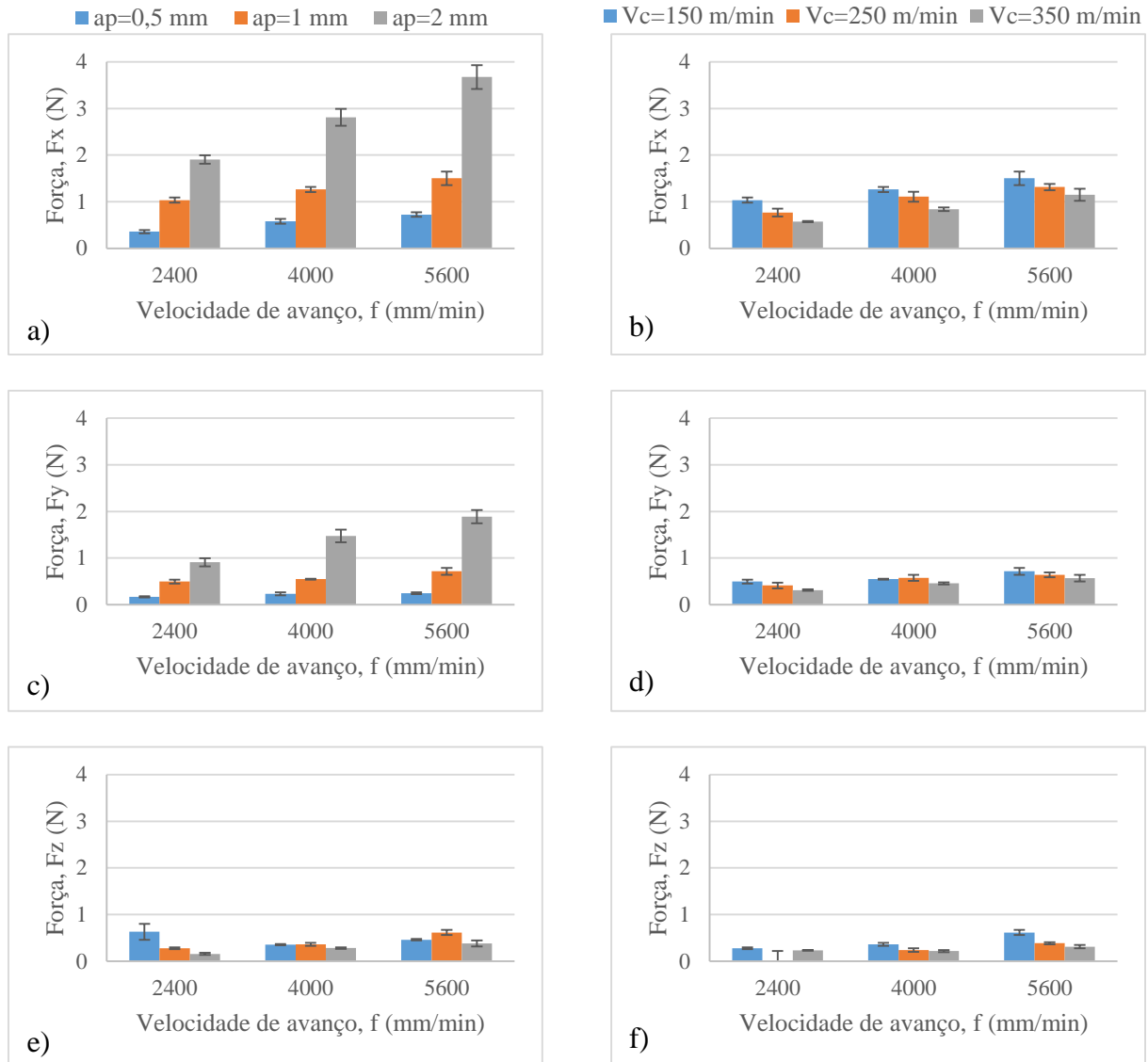


Figura 44 – Forças de maquinagem para humidade 0%: a) F_x em função de f e a_p ; b) F_x em função de f e V_c ; c) F_y em função de f e a_p ; d) F_y em função de f e V_c ; e) F_z em função de f e a_p ; f) F_z em função de f e V_c

4.1.2 Forças de maquinagem - humidade 8%

Na Figura 45 mostram-se os resultados de forças de maquinagem para provetes em gesso testados com teor de humidade de 8%, é possível observar efeitos nas forças em tudo semelhantes aos da Figura 44. Destaca-se apenas que a intensidade atingida pelas forças F_z é inferior, neste caso, às registadas para maquinagem com teor de humidade de 0%.

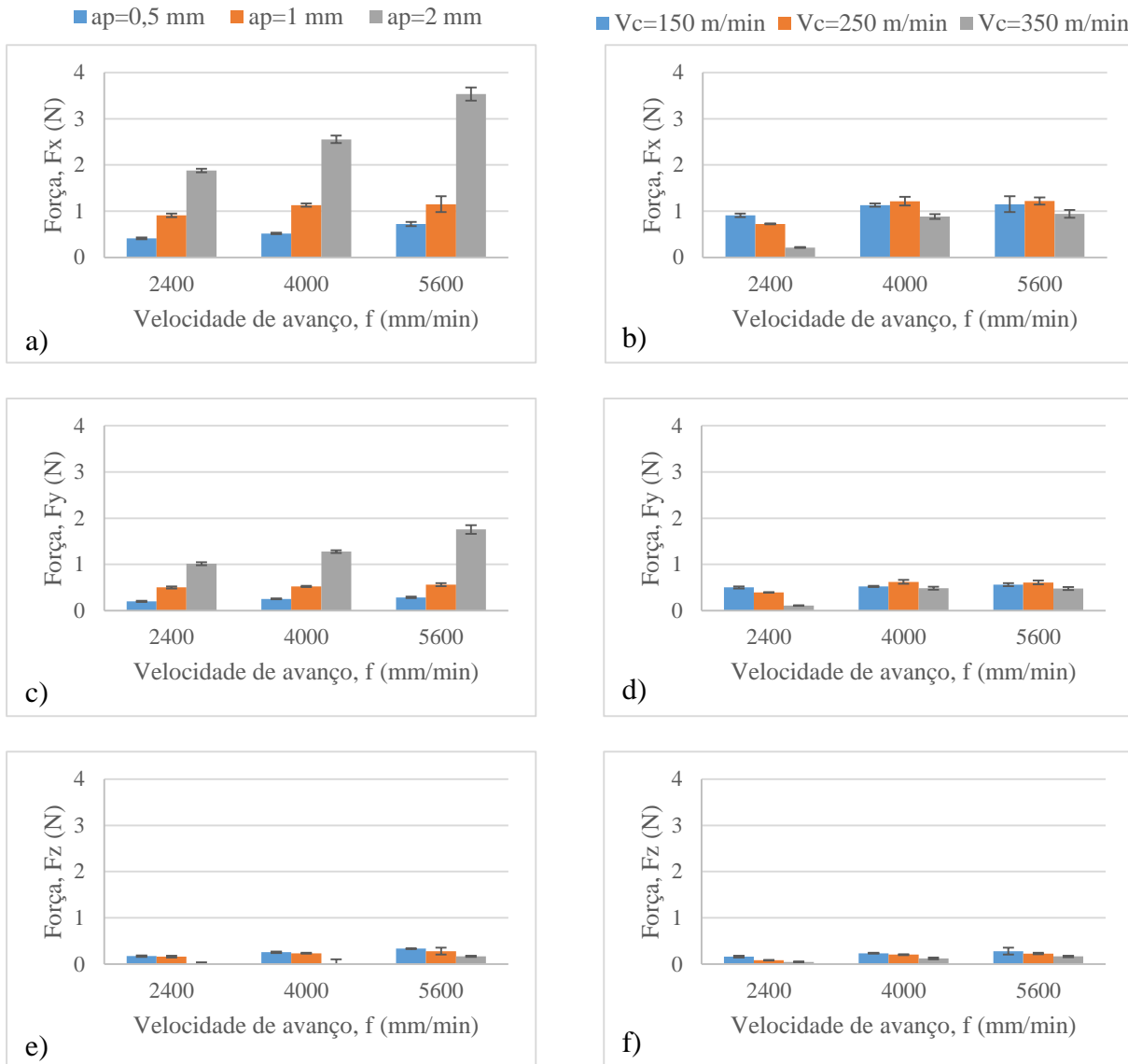


Figura 45 – Forças de maquinagem para humidade 8%: a) Fx em função de f e ap; b) Fx em função de f e Vc; c) Fy em função de f e ap; d) Fy em função de f e Vc; e) Fz em função de f e ap; f) Fz em função de f e Vc

4.1.3 Forças de maquinagem - humidade 20%

Quanto à Figura 46, que representa resultados de forças de maquinagem para provetes em gesso testados com teor de humidade de 20%, é de salientar que as intensidades das forças Fx e Fy registadas são superiores às analisadas até então. A força Fx e Fy máximas são aproximadamente de 14N e 7N, respetivamente. As forças Fx e Fy intensificam-se com o aumento da velocidade de avanço e da profundidade de corte (Figura 46 a) e c)) e diminuem ligeiramente com o aumento da velocidade de corte (Figura 46 b) e d)), tal como já observado para os casos de humidade de 0% e 8%. A força Fz apesar de continuar a ser a força menos

significativa em termos de intensidade, também é notório um aumento desta para a humidade de 20%.

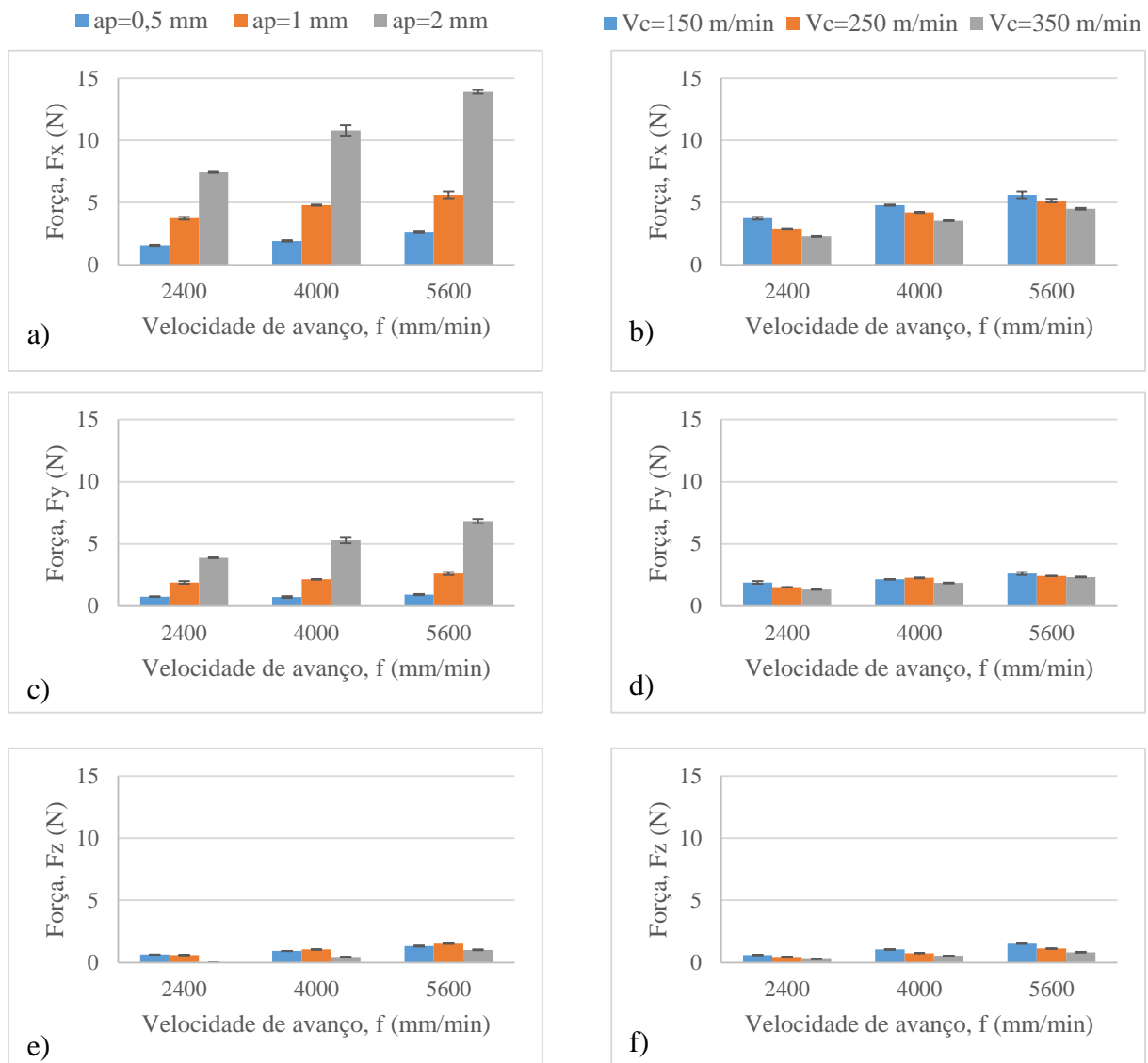


Figura 46 – Forças de maquinagem para humidade 20%: a) Fx em função de f e ap; b) Fx em função de f e Vc; c) Fy em função de f e ap; d) Fy em função de f e Vc; e) Fz em função de f e ap; f) Fz em função de f e Vc

4.1.4 Forças de maquinagem - efeito da humidade

Na Figura 47, apresentam-se os resultados de forças de maquinagem em função do teor de humidade dos provetes maquinados, facilitando a comparação dos resultados obtidos. Nestes gráficos observam-se claramente dois aspetos: primeiro, de um modo geral, as forças de maquinagem são pouco sensíveis à variação do teor de humidade; segundo, a influência da humidade só é notória para humidade relativa de 20%, pois os registos de forças relativas a 0% e 8% de humidade não apresentam variação significativa entre si.

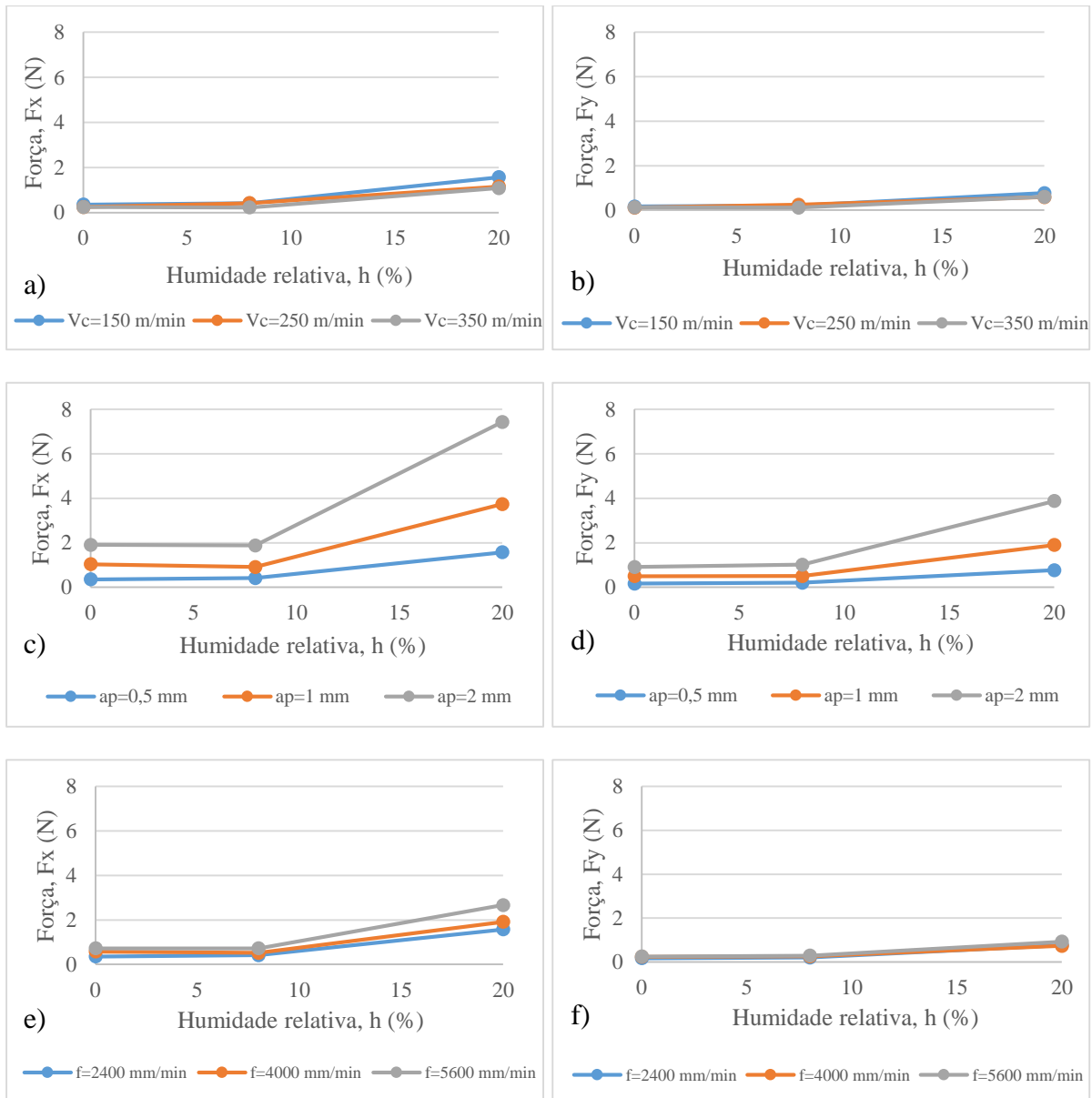


Figura 47 – Forças de maquinagem para humidade 0%, 8% e 20%: a) Fx em função de h e Vc; b) Fy em função de h e Vc; c) Fx em função de h e ap; d) Fy em função de h e ap; e) Fx em função de h e f; f) Fy em função de h e f

4.1.5 Rugosidades - humidade 0%

Na Figura 48 constam os resultados relativos às rugosidades das superfícies maquinadas para provetes em gesso testados com teor de humidade de 0%. Em primeiro lugar, constata-se que existe uma grande dispersão das medições efetuadas, pela representação das barras de erro, para os três parâmetros de rugosidade registados (R_a , R_z e R_{max}). Para além disso, não é notória uma tendência de evolução das rugosidades com o aumento dos valores dos parâmetros de corte testados. Tal pode estar relacionado com a dispersão de resultados. Centrando a análise nos gráficos referentes à rugosidade média, R_a , constata-se que esta varia entre 3 e 4 μm , aproximadamente. Ora, estes valores de rugosidade média encontram-se na gama de precisão

média para superfícies maquinadas de peças metálicas com processos convencionais e qualidades médias (torneamento, fresagem) [52].

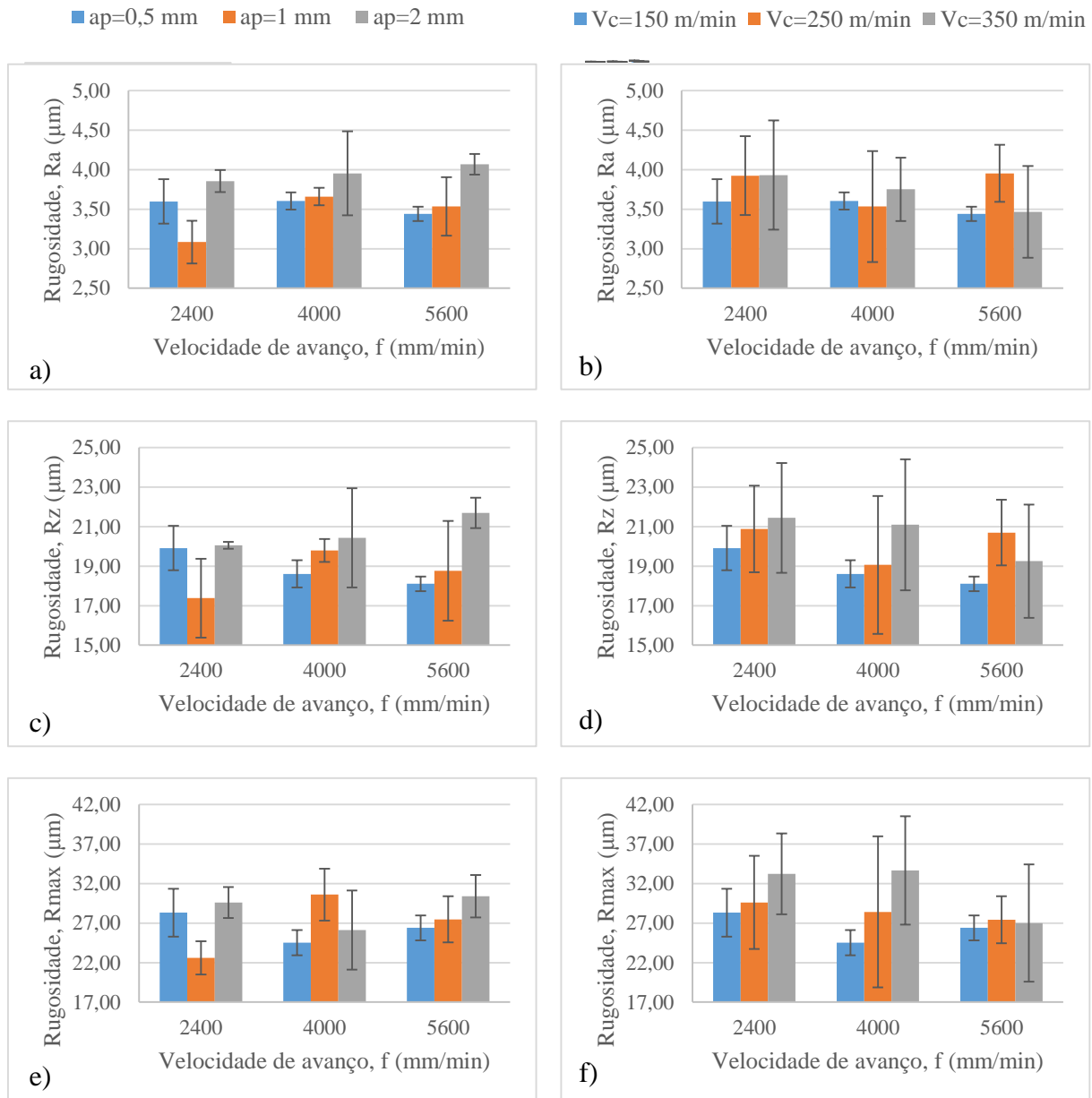


Figura 48 – Rugosidades para humidade 0%: a) Ra em função de f e ap; b) Ra em função de f e Vc; c) Rz em função de f e ap; d) Rz em função de f e Vc; e) Rmax em função de f e ap; f) Rmax em função de f e Vc

4.1.6 Rugosidades - humidade 8%

Os resultados de rugosidades para provetes em gesso testados com teor de humidade de 8% observam-se na Figura 49, onde se verifica também uma grande dispersão dos resultados obtidos e ausência de tendências notórias da evolução da rugosidade das superfícies com a variação dos parâmetros de corte. De um modo geral, na rugosidade média, Ra, registaram-se valores superiores aos analisados anteriormente, entre 3,5 e 5μm aproximadamente.

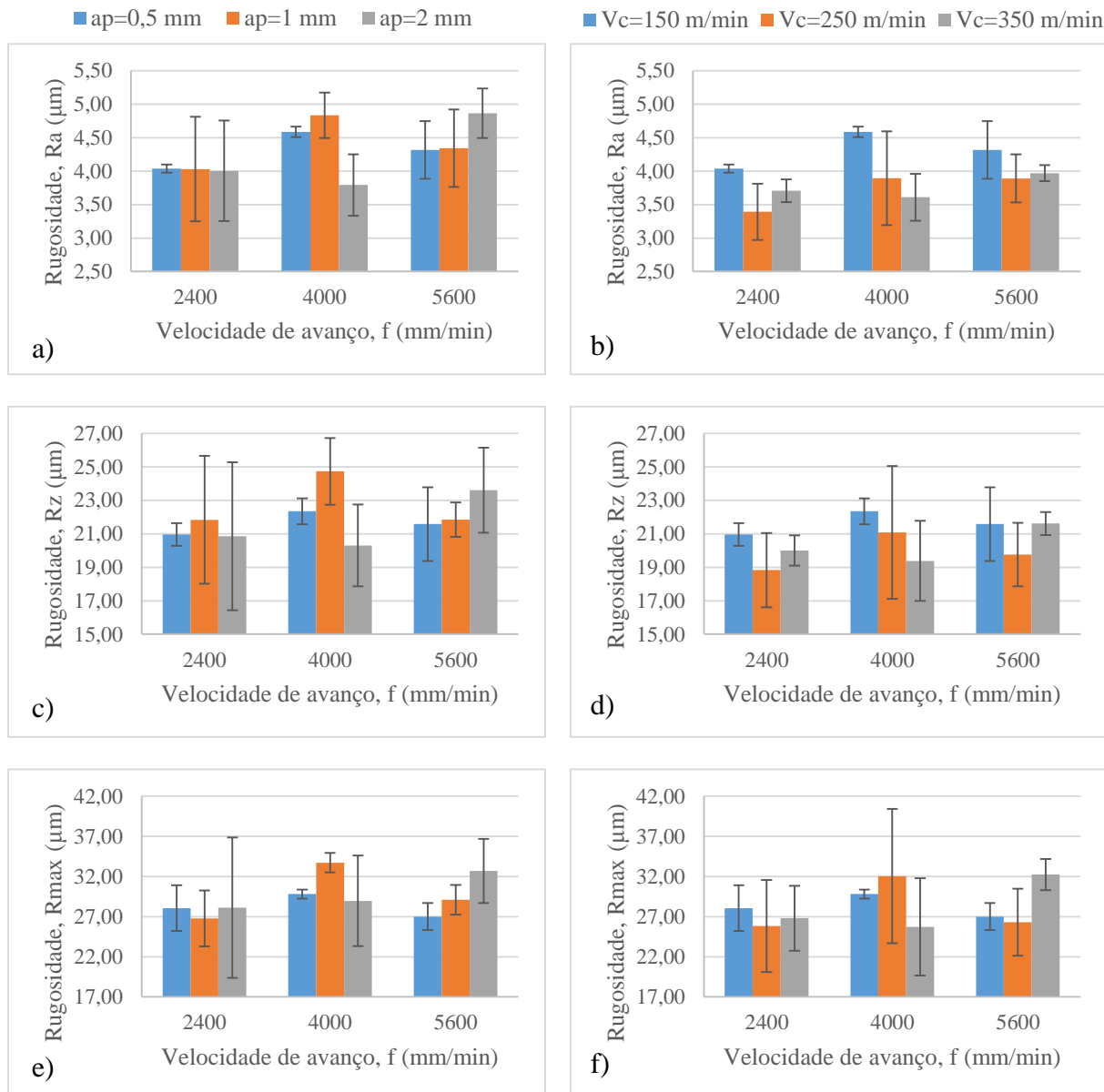


Figura 49 – Rugosidades para humidade 8%: a) Ra em função de f e ap; b) Ra em função de f e Vc; c) Rz em função de f e ap; d) Rz em função de f e Vc; e) Rmax em função de f e ap; f) Rmax em função de f e Vc

4.1.7 Rugosidades - humidade 20%

Na Figura 50, relativa a rugosidades para provetes em gesso testados com teor de humidade de 20%, existe grande dispersão de resultados tal como nos conjuntos de gráficos anteriores. Mas desta vez, focando os gráficos relativos à rugosidade média aritmética, Ra, é possível observar uma tendência de aumento da rugosidade com o aumento da velocidade de avanço e de diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. No entanto, é de salientar que a dispersão de resultados põe em causa estas constatações.

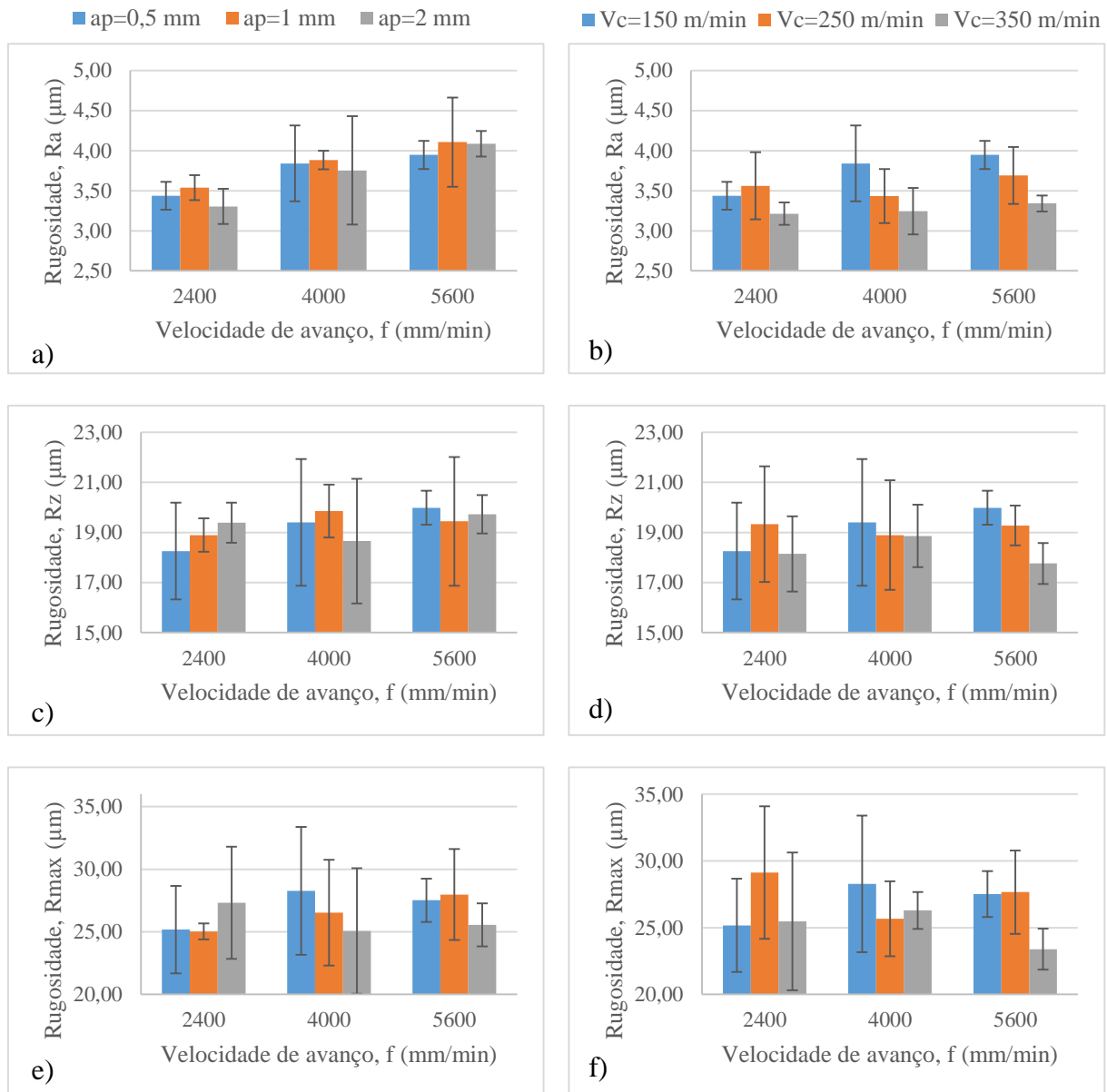


Figura 50 – Rugosidades para humidade 20%: a) Ra em função de f e a_p ; b) Ra em função de f e V_c ; c) Rz em função de f e a_p ; d) Rz em função de f e V_c ; e) R_{max} em função de f e a_p ; f) R_{max} em função de f e V_c

4.1.8 Rugosidade, Ra - humidade 0%, 8% e 20%

Na Figura 51 apresentam-se resultados da rugosidade média aritmética, Ra , em função do teor de humidade dos provetes maquinados. A comparação dos resultados mostra-se inconclusiva, uma vez que não é clara a influência da variação do teor de humidade dos provetes na qualidade da superfície maquinada. Mais uma vez, a dispersão das medições pode estar na origem destes resultados.

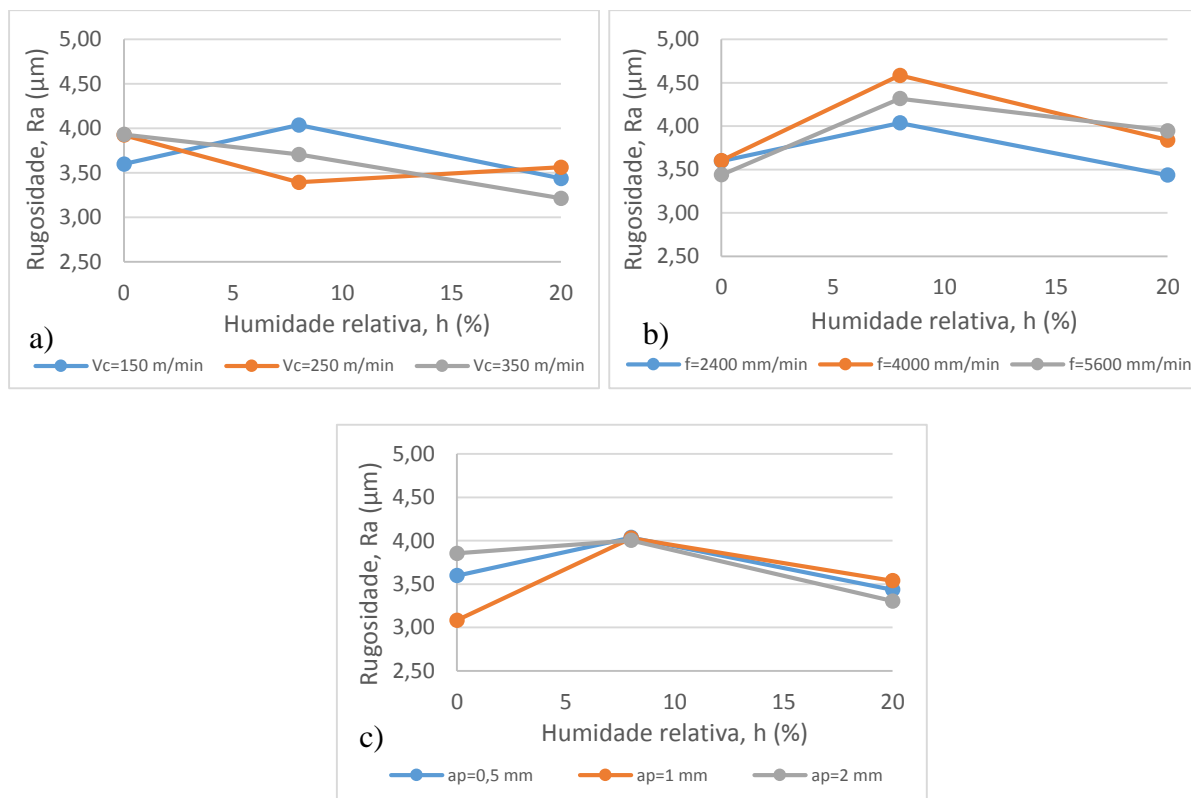


Figura 51 – Rugosidade R_a para humidade 0%, 8% e 20%: a) R_a em função de h e V_c ; b) R_a em função de h e f ; c) R_a em função de h e a_p

4.1.9 ANOVA - Rugosidade, R_a

Através do *software* Design Expert 10 foi possível fazer uma análise estatística pelo método ANOVA e uma otimização dos resultados do processo, tendo por base os dados experimentais da primeira fase de ensaios.

O teste estatístico ANALysis Of VARIance (ANOVA) é aplicado a planos experimentais para estabelecer o efeito dos fatores de entrada e suas interações na resposta estudada. O significado de cada fator ou interação é estabelecido usando o valor Fisher-Snedecor (F-value) calculado para um determinado nível de confiança expresso pelo P-value. O F-value representa a relação entre a média de quadrados do fator e a média de quadrados do erro (equação (4.1)).

$$F = \frac{MS_{factor}}{MS_{error}} \quad (4.1)$$

Para esta análise, o P-value (valor de prova) estabelecido foi de 0,05, o que corresponde a um intervalo de confiança de 95%. Se o P-value de um parâmetro for inferior a 0,05, o fator é considerado significativo, caso contrário o fator é considerado insignificante e excluído do modelo.

A primeira matriz de ensaios consiste num plano de fatorial completo com 4 fatores, cada um com 3 níveis de variação, ou seja, em cada ensaio é variado apenas um parâmetro e os três restantes permanecem inalterados. Assim, os quatro fatores de entrada são o teor de humidade, a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte. A resposta estudada foi a rugosidade média da superfície, Ra. Esta análise foi realizada para a rugosidade média, uma vez que os parâmetros de rugosidade foram os resultados obtidos com maior dispersão, para se estudar possíveis tendências de Ra em função dos parâmetros do processo, com validade estatística.

Para esta análise foi considerado o plano experimental com 3 repetições, de modo que a análise foi realizada numa matriz com 243 resultados.

De acordo com os resultados do teste ANOVA (Tabela 18), os fatores e interações significativos neste modelo são:

- A – teor de humidade, h;
- B – velocidade de corte, Vc;
- C – velocidade de avanço, f;
- AB – interação teor de humidade - velocidade de corte;
- AC – interação teor de humidade – velocidade de avanço;
- BC – interação velocidade de corte - velocidade de avanço;

A contribuição de um fator é calculada com a relação entre a soma dos quadrados (SS) desse fator e a soma dos quadrados do modelo total. De acordo com os resultados do teste, o teor de humidade é o fator mais importante, com contribuição de 15%, seguido da velocidade de corte, com contribuição de 8,91%, e velocidade de avanço com contribuição de 4,87%.

Tabela 18 – Resultados do teste ANOVA para rugosidade Ra

	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média de quadrados	F-value	P-value	Contribuição %
MODELO	21.27	10	2.13	13.93	<0.0001	
A	8.51	2	4.25	27.85	<0.0001	15.00
B	5.05	1	5.05	33.08	<0.0001	8.91
C	2.76	1	2.76	18.07	<0.0001	4.87
AB	1.95	2	0.97	6.38	0.002	3.44
AC	1.45	2	0.73	4.75	0.0095	2.56
BC	0.76	1	0.76	4.97	0.0267	1.34
Resíduo	35.43	232	0.15			
TOTAL	56.71	242				

A influência dos fatores significativos e das interações são representados na Figuras 50. A sua análise permite concluir que os maiores valores de rugosidade da superfície ocorreram em provetes com teor de humidade de 8%, enquanto a menor rugosidade da superfície foi obtida para 20% de humidade (Figura 52 a)). No entanto, as diferenças entre 20% e 0% de humidade são muito pequenas, indicando que não é necessário secar completamente os provetes.

O aumento da velocidade de corte reduz os valores de rugosidade da superfície (Figura 52 b)). Em média, há uma redução de 9,04% do valor da rugosidade da superfície. A rugosidade da superfície aumenta linearmente com o aumento da velocidade de avanço (Figura 52 c)). De notar ainda que a influência da profundidade de corte na rugosidade da superfície é estatisticamente insignificante.

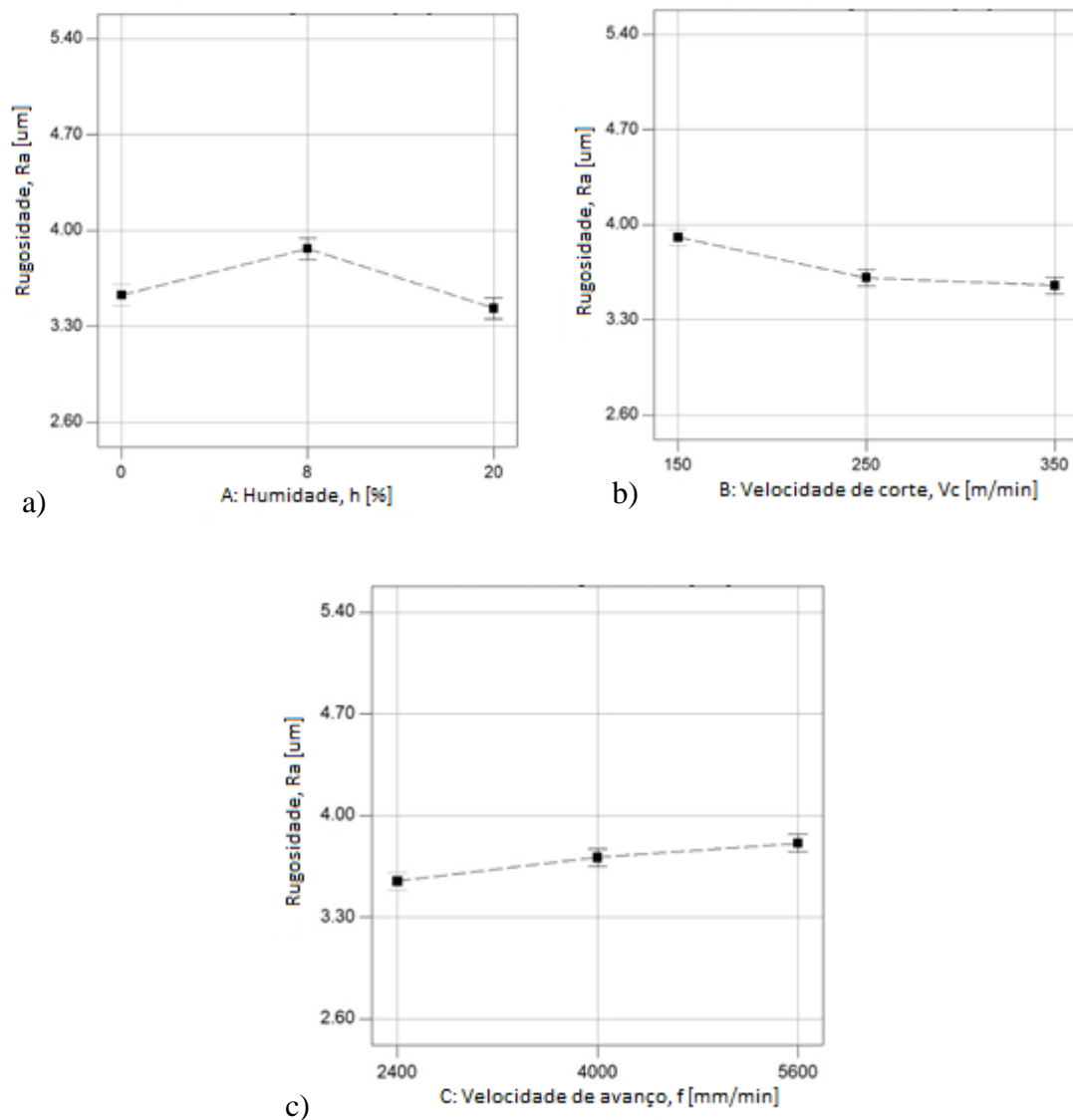


Figura 52 – Efeitos na rugosidade Ra: a) Humidade h; b) Velocidade de corte, Vc; c) Velocidade de avanço, f

Como já referido, o aumento da velocidade de corte reduz os valores de rugosidade da superfície, mas essa influência reduz quando a velocidade de corte também aumenta. As interações humidade – velocidade de corte (Figura 53 a)) e humidade – velocidade de avanço (Figura 53 b)) mostram maior dependência das variáveis para teores de humidade entre 0 e 8%.

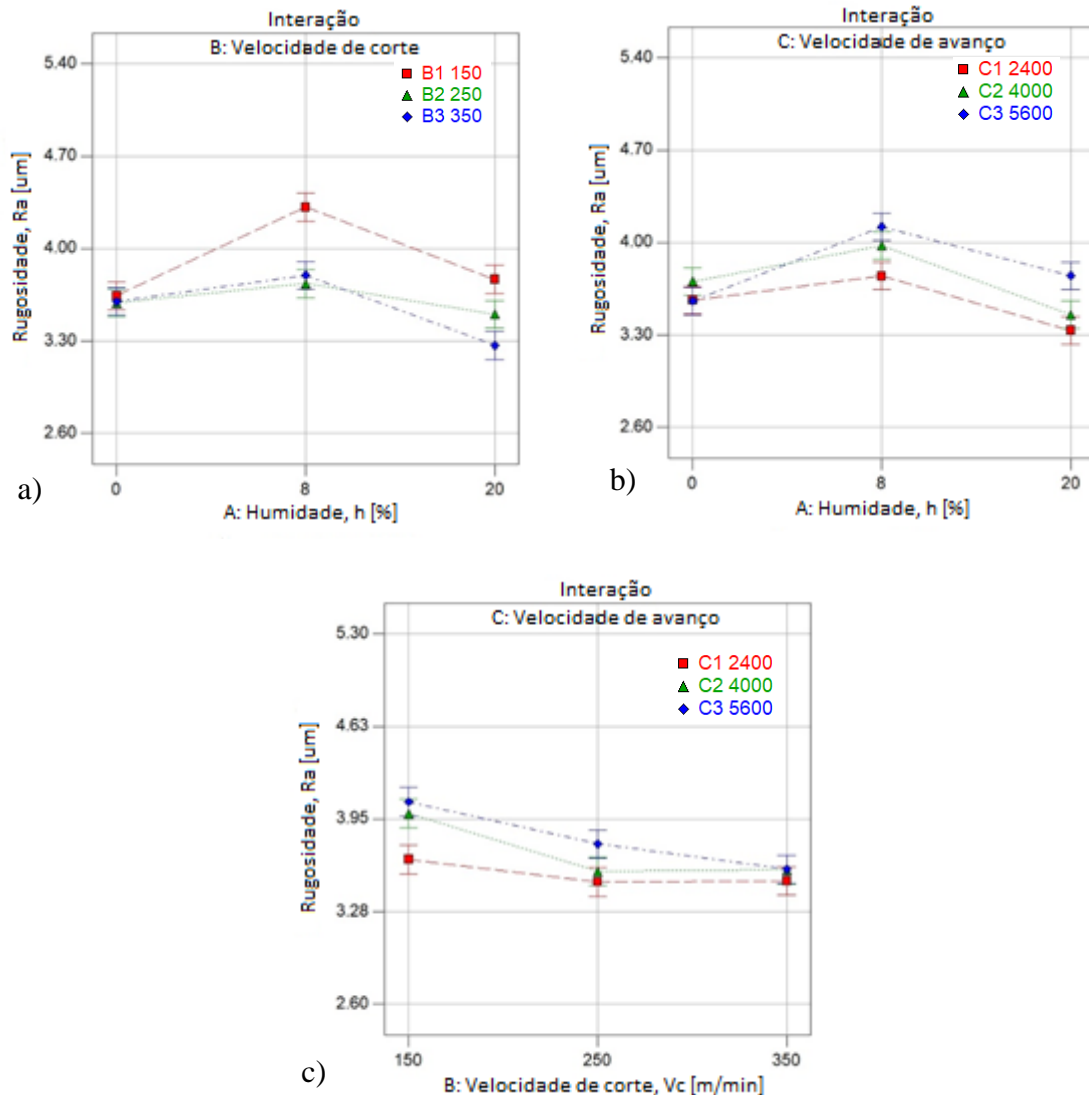


Figura 53 – Efeito das interações: a) Humidade - Velocidade de corte; b) Humidade – Velocidade de avanço; c) Velocidade de corte - Velocidade de avanço

Para além da análise estatística ANOVA, foi possível realizar uma otimização dos parâmetros do processo usando as seguintes condições: qualquer valor dentro do intervalo de variação para os parâmetros do processo (teor de humidade, velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte) e valor mínimo alvo para a rugosidade da superfície (Ra).

A solução proposta foi a seguinte combinação de parâmetros (Figura 54):

- Teor de humidade: $h = 20\%$ (representado na Figura 54 como $h=3$);
- Velocidade de corte: $V_c = 318,34 \text{ m / min}$;

- Velocidade de avanço: $f = 2400 \text{ mm / min}$;
- Profundidade de corte: $a_p = 0,87 \text{ mm}$;

O valor estimado da rugosidade da superfície para esta combinação de parâmetros de corte é $Ra = 3,17 \mu\text{m}$.

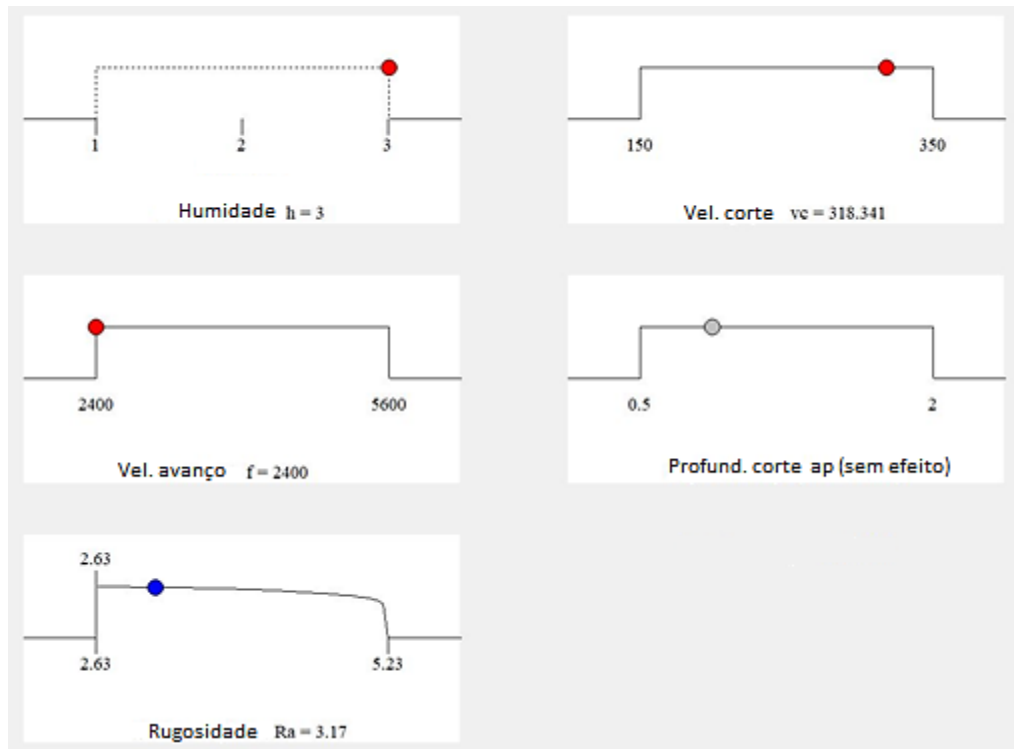


Figura 54 – Otimização do processo

4.2 Segunda fase de ensaios - Método Taguchi

Na segunda fase de ensaios, optou-se por um plano de ensaios com base no método Taguchi (Secção 3.11) aliado a uma análise estatística ANOVA, de forma a estudar a influência de cada parâmetro de corte nas forças que ocorrem durante o processo de fresagem do gesso e na qualidade superficial do material. Para além disto, a matriz Taguchi escolhida (L_{18}) permite o estudo da interação entre duas variáveis do processo, neste caso preferiu-se analisar a interação entre a humidade e a velocidade de corte, pois nos resultados anteriores mostrou ser a interação de maior influência. Para este estudo usou-se o *software* SuperANOVA.

Decidiu-se alterar os valores de humidade alvo de estudo de forma a aproximar as condições de maquinagem das condições de aplicação finais no ADIMAQ. Assim, optou-se por maquinar provetes secos com aproximadamente 20% de humidade, à semelhança do que foi efetuado na primeira fase de ensaios, e provetes em verde, isto é, provetes que ainda não estão estabilizados e que foram maquinados 1 dia após vazamento do material. Em seguida serão apresentados os

resultados da análise ANOVA para as forças de corte F_x , F_y e F_z e para os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_{max} .

4.2.1 ANOVA - Força de maquinagem, F_x

O teste ANOVA para a força F_x revelou que todos os fatores estudados influenciam a resposta F_x . Isto porque o valor de prova P-value é inferior a 0,05 para todos os parâmetros em análise, o que significa que apresentam efeitos estatisticamente relevantes na resposta F_x (Tabela 19).

Tabela 19 – Resultados ANOVA para força F_x

Efeitos principais:	Variações (somadas de quadrados)	Graus de liberdade	Desvios quadráticos médios	F-value	P-value	Contribuição %
Humidade [%]	99,154	1	99,154	16,767	0,0002	6,7
Vel. corte [m/min]	257,415	2	128,707	21,765	0,0001	17,5
Vel. avanço [mm/min]	321,370	2	160,685	27,172	0,0001	22,1
Profund. corte [mm]	402,268	2	201,134	34,012	0,0001	27,9
Humidade x Vel. corte	59,615	2	29,808	5,0406	0,0107	3,4
Resíduo (erro)	260,197	44	5,914			22,4
Total	1400,021	53				100,0

A profundidade de corte é o parâmetro que mais influencia a força F_x , com contribuição de 27,9%, seguida da velocidade de avanço com contribuição de 22,1% e da velocidade de corte com contribuição de 17,5%. Os efeitos causados pelo teor de humidade e pela interação humidade – velocidade de corte, apesar de estatisticamente aceites, apresentam contribuição mais reduzida na resposta F_x .

No fator resíduo estão reunidos todos os efeitos não estudados ou não controladas na variação de F_x , como por exemplo, as vibrações da máquina, as condições ambientais, entre outras. Considera-se que um resíduo de 22,4% é um valor aceitável neste panorama experimental.

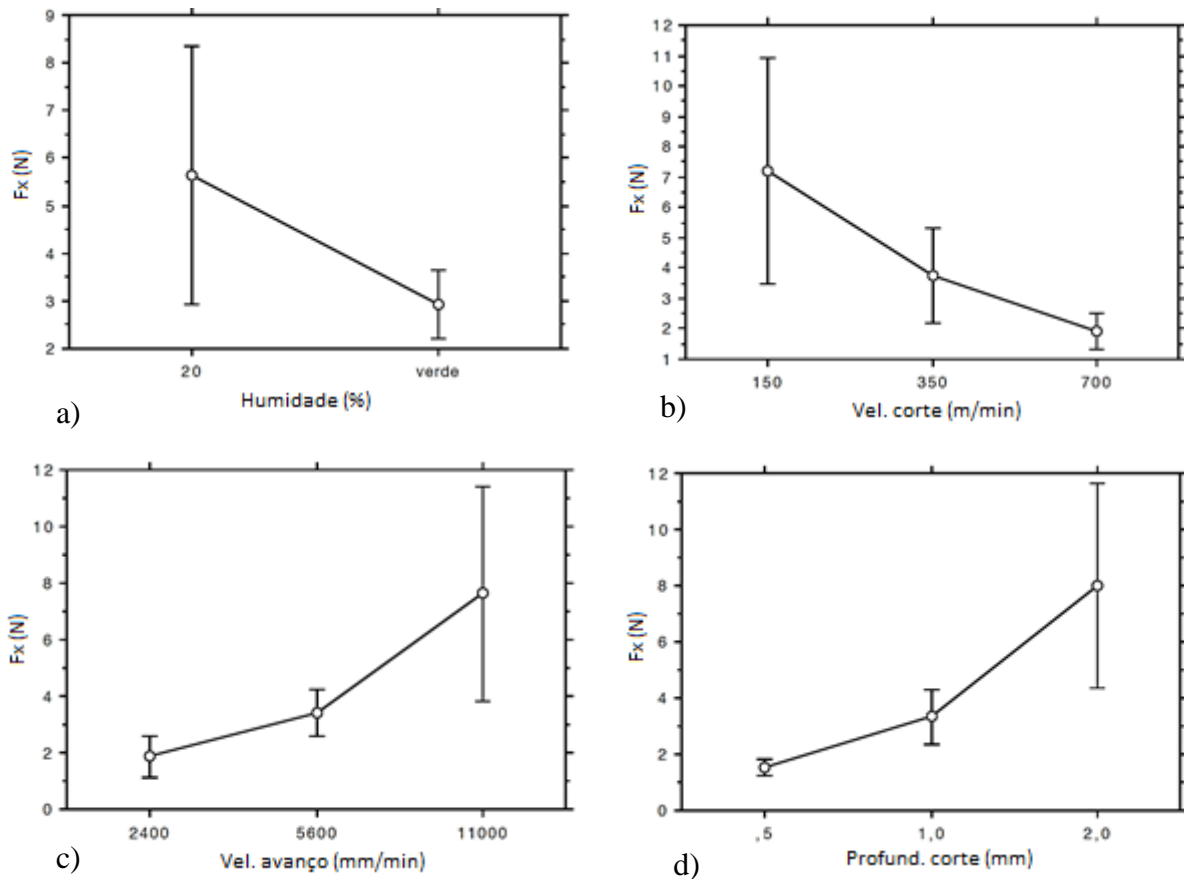


Figura 55 – Efeitos dos parâmetros na força de maquinagem F_x : a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte

A análise dos gráficos da Figura 55 permite concluir que:

- Quando a humidade aumenta, a força F_x diminui;
- O aumento da velocidade de corte provoca diminuição de F_x ;
- O aumento da velocidade de avanço provoca aumento proporcional de F_x ;
- Quando aumenta a profundidade de corte, F_x também aumenta proporcionalmente.

Os esforços diminuem com o aumento do teor de humidade devido ao estado físico do material. O gesso é um material que se caracteriza pelo seu estado pastoso quando se encontra na condição aqui designada verde, e por outro lado, caracteriza-se pelo seu estado frágil quando se encontra seco. Assim, o material no estado frágil apresenta maior resistência ao corte e por isso, as reações provocadas pelo corte de material são de intensidade superior às verificadas no estado verde. Neste último estado, o material apresenta comportamento mais plástico e, portanto, com menor resistência à deformação provocada pelo corte, traduzindo-se isto em esforços de menor intensidade.

O facto da intensidade da força F_x diminuir com o aumento da velocidade de corte faz sentido segundo o conhecimento geral de maquinagem. Isto é, geralmente quando se pretende

maquinar uma peça em fase de acabamento, aumenta-se a velocidade de corte, de forma a diminuir os esforços causados e as vibrações na máquina, permitindo um melhor acabamento.

Os efeitos do aumento da velocidade de avanço e da profundidade de corte são semelhantes, provocando aumento da força de corte F_x . O aumento da velocidade de avanço resulta em aparas de maiores dimensões. Ora, tal implica sempre maiores esforços de maquinagem. O aumento da profundidade de corte também resulta no corte de maiores aparas. Se as condições de velocidade forem as mesmas, facilmente se entende que para se retirar mais material numa só passagem da ferramenta, maiores esforços serão causados. Quanto maior a profundidade de corte, maior será a parede que causa reações, logo maiores serão as intensidades das reações ao corte. Tal justifica também o facto da profundidade de corte ser o parâmetro com maior contribuição nos efeitos causados na resposta da força F_x .

A análise ANOVA para a matriz Taguchi L_{18} permite o estudo da interação entre duas variáveis do processo.

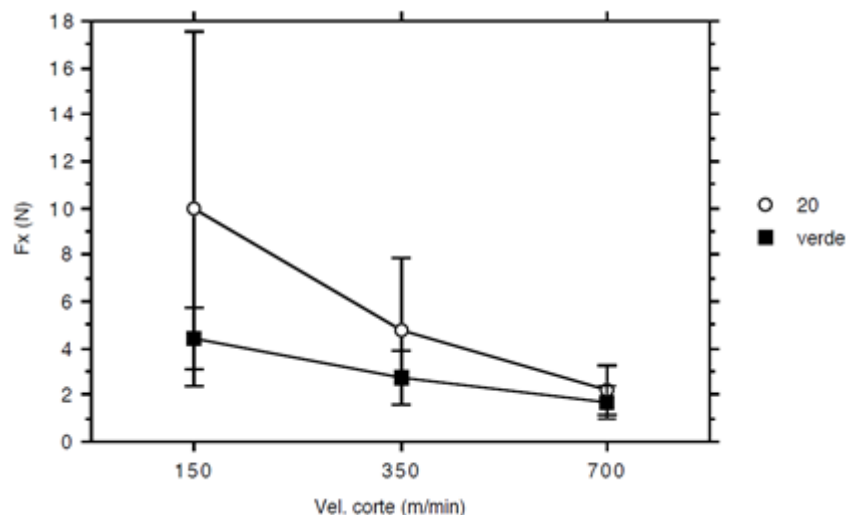


Figura 56 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na força F_x

A interação humidade – velocidade de corte (Figura 56) é estatisticamente relevante, no entanto nota-se uma dependência superior entre os parâmetros para velocidades de corte inferiores, porque o declive das linhas de tendência é mais acentuado entre 150 e 350 m/min do que entre 350 e 700 m/min. Assim, a força F_x verifica um decréscimo maior com a velocidade de corte, com 20% de humidade do que em estado verde.

4.2.2 ANOVA - Força de maquinagem, Fy

Quanto à força Fy, a análise revelou que todos os fatores estudados influenciam a resposta Fy. Isto porque o valor de prova P-value é inferior a 0,05 para todos os parâmetros em análise, o que significa que apresentam efeitos estatisticamente relevantes na resposta Fy (Tabela 20).

Tabela 20 - Resultados ANOVA para força Fy

Efeitos principais:	Variações (somadas de quadrados)	Graus de liberdade	Desvios quadráticos médios	F-value	P-value	Contribuição %
Humidade [%]	23,378	1	23,378	9,234	0,0040	4,8
Vel. corte [m/min]	51,618	2	25,809	10,194	0,0002	10,7
Vel. avanço [mm/min]	72,769	2	36,384	14,372	0,0001	15,6
Profund. corte [mm]	149,883	2	74,942	29,601	0,0001	33,3
Humidade x Vel. corte	26,214	2	13,107	5,177	0,0096	4,9
Resíduo (erro)	111,394	44	2,532			30,8
Total	435,256	53				100,0

Tal como se verificou para Fx, a profundidade de corte é o parâmetro que influencia mais a força Fy, com contribuição de 33,3%, seguida da velocidade de avanço com contribuição de 15,6% e da velocidade de corte com contribuição de 10,7%. Os efeitos causados pelo teor de humidade e pela interação humidade – velocidade de corte, apesar de estatisticamente aceites, apresentam contribuições mais reduzidas na resposta Fy.

À semelhança do que já foi referido em relação à força Fx, a análise da Figura 57 permite concluir que:

- Quando a humidade aumenta, a força Fy diminui;
- O aumento da velocidade de corte provoca diminuição de Fy;
- O aumento da velocidade de avanço provoca aumento de Fy;
- Quando aumenta a profundidade de corte, Fy também aumenta.

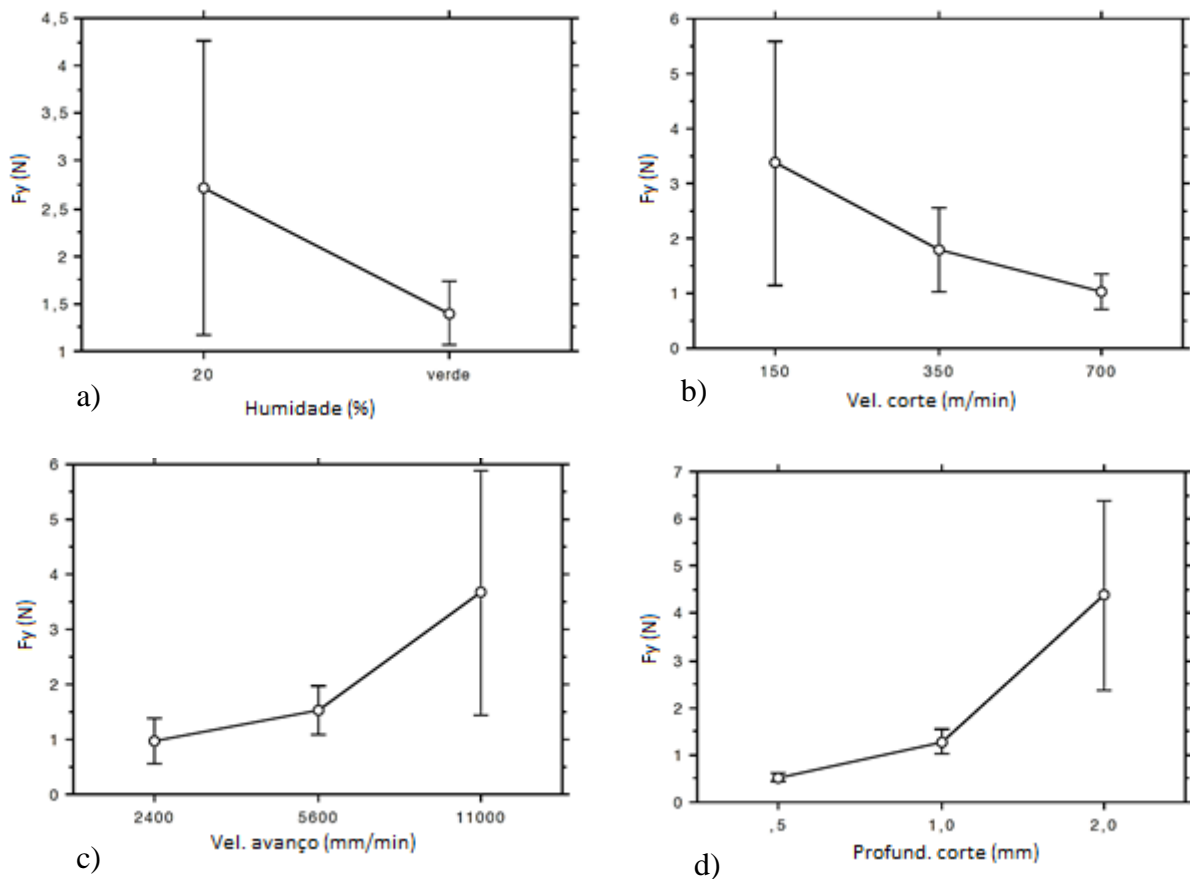


Figura 57 - Efeitos dos parâmetros na força de maquinagem F_y : a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte

A resposta da força F_y à variação do teor de humidade ou dos parâmetros de corte é em tudo semelhante à resposta F_x , já apresentada. Tal verifica-se, pois estas são forças que atuam no mesmo plano (Figura 36) e que retratam o mesmo tipo de interação entre a ferramenta e o material. Isto é, F_x e F_y representam reações do material ao avanço e corte por parte da ferramenta. O que difere estas forças, para além da direção, é a sua intensidade. F_y apresenta de forma geral valores de intensidade inferiores a F_x . Isto significa que as forças de corte são menores na direção do avanço da ferramenta do que na direção perpendicular.

A interação humidade – velocidade de corte (Figura 58) é estatisticamente relevante, no entanto, tal como para F_x , nota-se uma dependência superior entre os parâmetros para velocidades de corte inferiores, porque o declive entre as retas é mais acentuado entre 150 e 350 m/min do que entre 350 e 700 m/min. Assim, a força F_y verifica um decréscimo maior com 20% de humidade do que em estado verde.

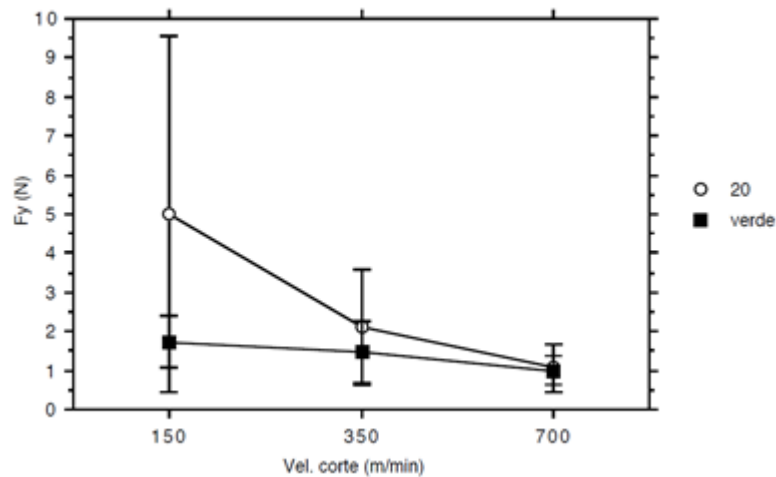


Figura 58 - Efeito da interação umidade – velocidade de corte na força Fy

4.2.3 ANOVA - Força de maquinagem, Fz

A análise para Fz revelou que nem todos os fatores estudados influenciam a resposta Fz. A umidade reprova no valor de prova P-value por ser superior a 0,05, logo o efeito deste parâmetro não é estatisticamente válido para um intervalo de confiança de 95%. Para os restantes fatores em estudo o valor de prova P-value é inferior a 0,05, o que significa que apresentam efeitos estatisticamente relevantes na resposta Fz (Tabela 21).

Tabela 21 - Resultados ANOVA para força Fz

Efeitos principais:	Variações (somadas de quadrados)	Graus de liberdade	Desvios quadráticos médios	F-value	P-value	Contribuição %
Humidade [%]	1,373	1	1,373	1,696	0,1996	0,5
Vel. corte [m/min]	30,591	2	15,295	18,899	0,0001	24,7
Vel. avanço [mm/min]	32,055	2	16,027	19,804	0,0001	26,0
Profund. corte [mm]	7,964	2	3,982	4,920	0,0118	5,4
Humidade x Vel. corte	9,586	2	4,793	5,923	0,0053	6,8
Resíduo (erro)	35,609	44	0,809			36,6
Total	117,178	53				100,0

Neste caso, a velocidade de avanço é o parâmetro que influencia mais a força Fz, com contribuição de 26,0%, seguida da velocidade de corte com contribuição de 24,7%. Os efeitos

causados pela profundidade de corte e pela interação humidade – velocidade de corte, apesar de estatisticamente aceites, apresentam contribuição mais reduzida na resposta F_z .

No caso das forças F_x e F_y (Figura 55 e 57), a profundidade de corte era o parâmetro mais influente, mas para F_z tal não se verifica. As velocidades de avanço e corte são as variáveis que provocam maiores efeitos na resposta F_z , com valores de contribuição próximos. Cerca de 36% da variação de F_z não é explicada por nenhum dos fatores estudados.

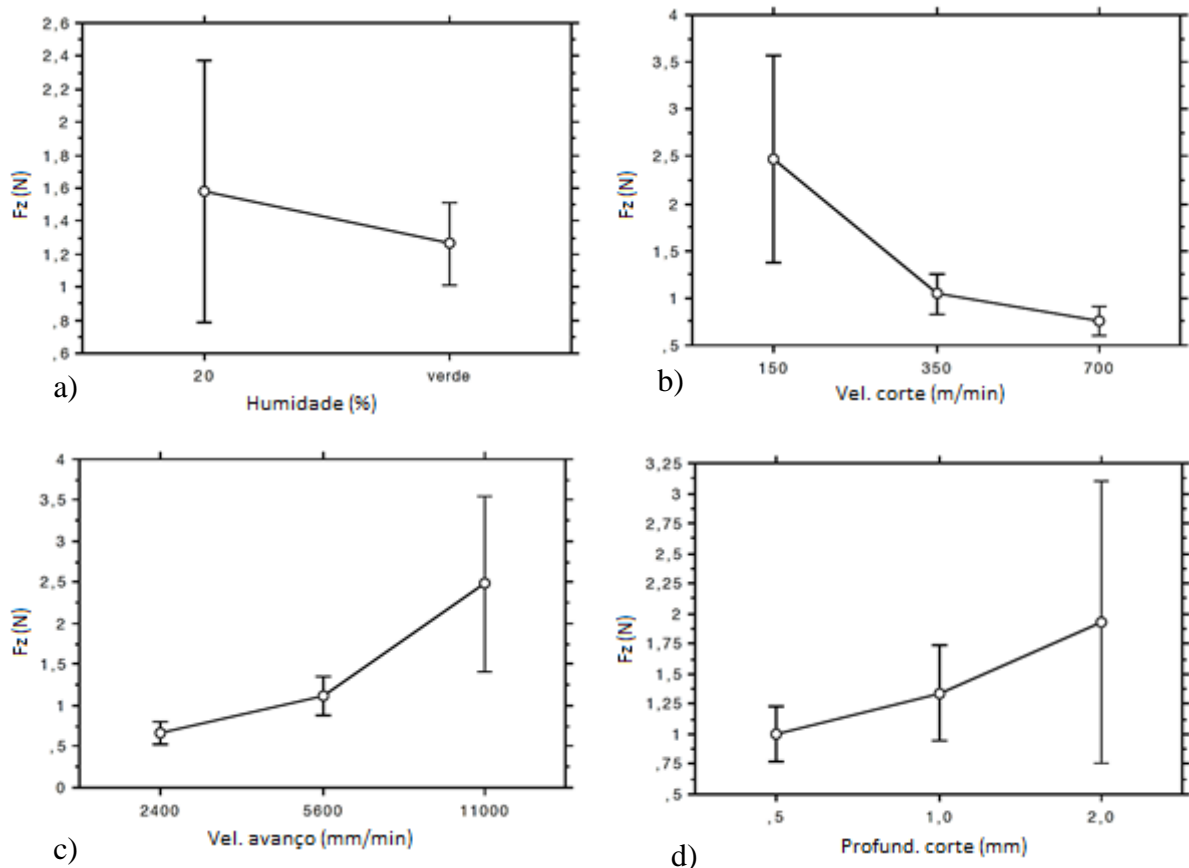


Figura 59 - Efeitos dos parâmetros na força de maquinagem F_z : a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte

À semelhança do que já referido em relação às forças F_x e F_y , a análise da Figura 59 permite concluir que:

- O aumento da velocidade de corte provoca diminuição de F_z ;
- O aumento da velocidade de avanço provoca aumento de F_z ;
- Quando aumenta a profundidade de corte, F_z também aumenta;

Apesar da influência da humidade ser rejeitada estatisticamente para um intervalo de confiança de 95%, verifica-se graficamente que existe uma tendência de diminuição da força F_z com o aumento da humidade do material.

A resposta F_z para a variação dos parâmetros de corte é muito semelhante às respostas F_x e F_y , já exploradas anteriormente. Aqui destaca-se essencialmente a diferença de intensidades das forças de corte, sendo que a intensidade das forças F_z registadas é inferior à das forças F_x e F_y .

Em todos os gráficos de evolução dos esforços F_x , F_y e F_z , existe maior dispersão de resultados para forças de intensidade superior. Isto é, o aumento de esforço vem sempre acompanhado de aumento da dispersão de resultados e, por isso as barras de intervalo de confiança de 95% também são mais alargadas. Nos gráficos, para cada ponto, é representado o valor médio e uma barra que indica o intervalo de confiança, significando que é igualmente provável a intensidade da força tomar qualquer valor dentro desse intervalo. Posto isto, o facto do intervalo de resultados prováveis aumentar para forças superiores indica que, quando os esforços de maquinagem aumentam a intensidade, existe maior variabilidade de resultados. O aumento da dispersão de resultados pode estar relacionado com outros fatores do processo, como o aumento das vibrações na máquina.

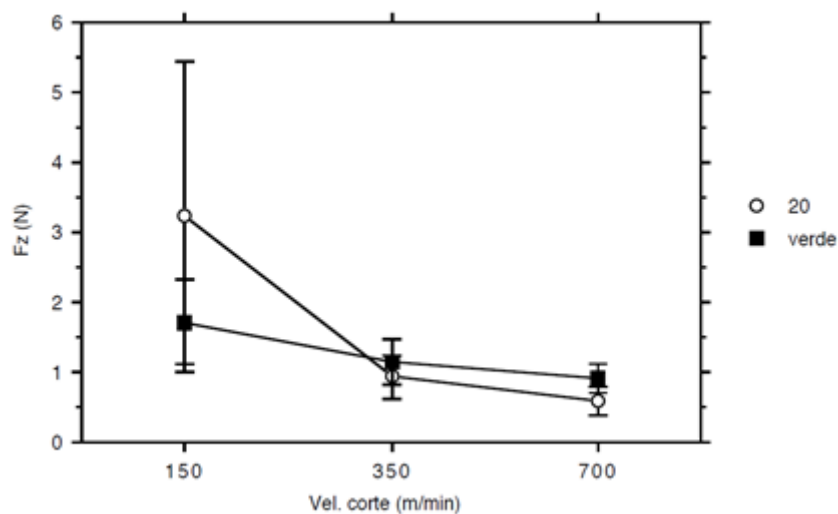


Figura 60 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na força F_z

A interação humidade – velocidade de corte (Figura 60) é estatisticamente relevante. Tal como observado para F_x e F_y , o teor de humidade tem maior efeito ara velocidades mais baixas entre 150 e 350 m/min do que entre 350 e 700 m/min. Assim, a força F_z verifica um decréscimo maior com 20% de humidade do que em estado verde.

4.2.4 ANOVA - Rugosidade, R_a

A análise para a rugosidade R_a revelou que todos os fatores estudados reprovam no valor de prova P-value, à exceção da humidade e da interação humidade – velocidade de corte. Apenas

estes parâmetros apresentam P-value inferior a 0,05, o que significa que os efeitos na variação da rugosidade devem-se em grande parte à humidade do gesso (Tabela 22).

Tabela 22 - Resultados ANOVA para rugosidade Ra

Efeitos principais:	Variações (somadas de quadrados)	Graus de liberdade	Desvios quadráticos médios	F-value	P-value	Contribuição %
Humidade [%]	20,061	1	20,061	197,583	0,0001	73,5
Vel. corte [m/min]	0,559	2	0,279	2,753	0,0748	1,3
Vel. avanço [mm/min]	0,413	2	0,206	2,033	0,1431	0,8
Profund. corte [mm]	0,144	2	0,072	0,712	0,4965	0,0
Humidade x Vel. corte	1,501	2	0,751	7,392	0,0017	4,8
Resíduo (erro)	4,467	44	0,102			19,6
Total	27,145	53				100,0

A humidade é responsável por 73,5% da contribuição nos efeitos da resposta da rugosidade Ra. Enquanto a interação humidade – velocidade de corte apresenta uma contribuição de 4,8%.

Esta análise permitiu descobrir que para um intervalo de confiança de 95%, a rugosidade da superfície do material maquinado é independente dos parâmetros de corte aplicados. Importa salientar que com a análise ANOVA estuda-se a influência das variáveis do processo independentemente umas das outras. Portanto os efeitos aqui relatados relativos à humidade devem-se exclusivamente à variação deste parâmetro.

A análise da Figura 61 permite concluir que o aumento da humidade provoca grande diminuição da rugosidade Ra. Verifica-se uma redução de cerca de 1µm na rugosidade quando se passa da maquinagem de um provete seco com 20% de humidade, aproximadamente, para um provete em estado verde.

Apesar dos restantes fatores serem rejeitados estatisticamente para um intervalo de confiança de 95%, verifica-se graficamente que existe uma tendência de aumento da rugosidade Ra com o aumento da velocidade de avanço. Para a velocidade de corte e profundidade de corte não é possível referir uma tendência de efeito na rugosidade com base nestes gráficos.

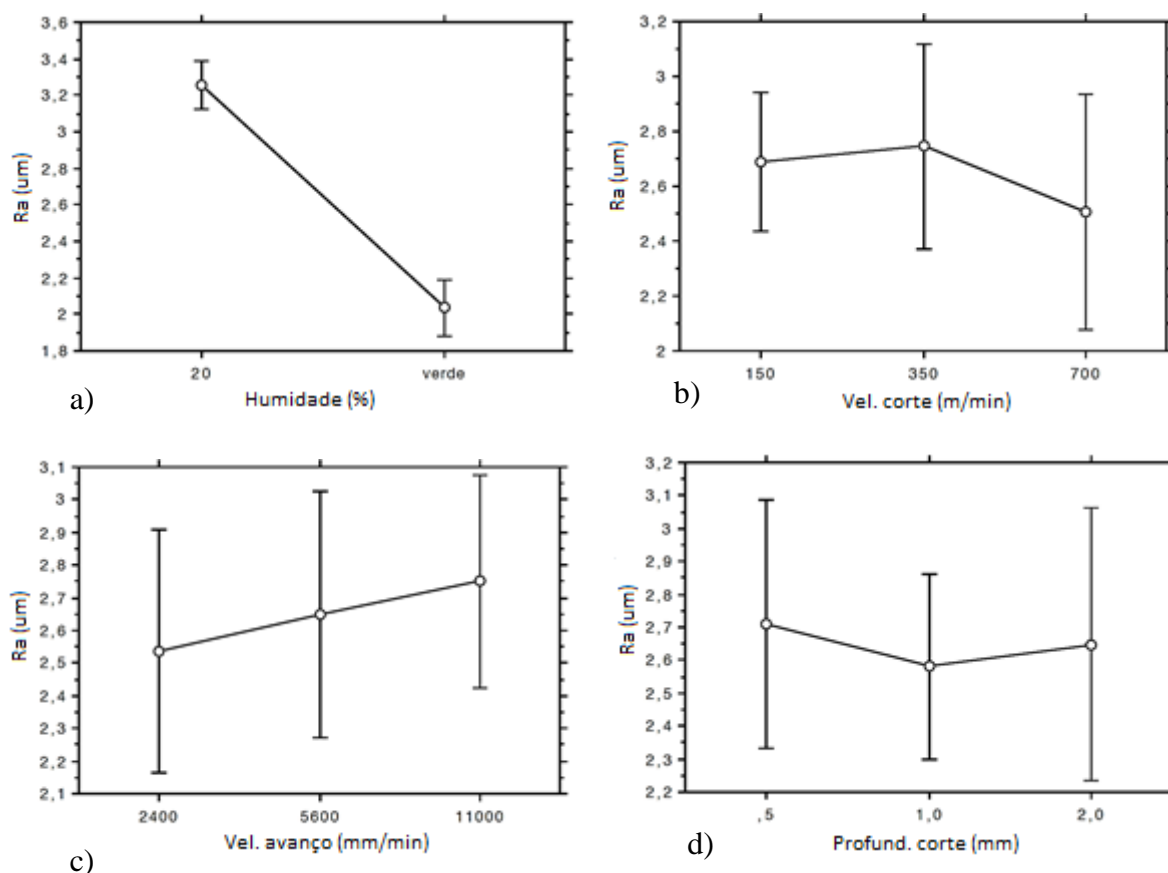


Figura 61 - Efeitos dos parâmetros na rugosidade R_a : a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte

De notar que, os três parâmetros rejeitados estatisticamente apresentam intervalos de confiança bastante alargados, evidenciando uma grande dispersão de resultados. A variabilidade de resultados pode estar relacionada com erros de medição ou outros fatores não controláveis, como as condições ambientais, uma vez que o gesso é um material muito sensível às condições envolventes. A invalidação dos efeitos da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte na rugosidade R_a pode de facto ser devida à fraca contribuição destes parâmetros, mas também pode ter sido afetada pela elevada dispersão de resultados.

A interação humidade – velocidade de corte (Figura 62) é estatisticamente relevante. Em comparação com esta interação para esforços, verifica-se o efeito oposto na rugosidade. Isto é, a rugosidade diminui com o aumento da velocidade de corte para o estado verde, mas por outro lado, a rugosidade aumenta com a velocidade de corte para o estado seco (20% de humidade). No entanto, esta interação é mais notória entre 150 e 350 m/min do que entre 350 e 700 m/min. Assim, existe uma dependência superior entre os parâmetros para velocidades de corte inferiores, sendo que a rugosidade R_a verifica aumento com 20% de humidade e decréscimo em estado verde.

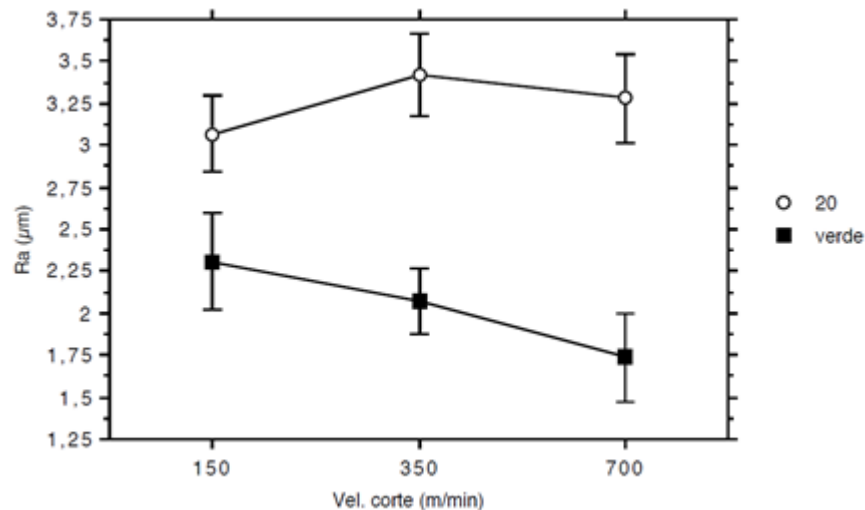


Figura 62 - Efeito da interação umidade – velocidade de corte na rugosidade Ra

4.2.5 ANOVA - Rugosidade, Rz

A análise para a rugosidade Rz revelou que todos os fatores estudados reprovam no valor de prova, P-value, à exceção da umidade e da interação umidade – velocidade de corte, tal como para a rugosidade Ra. Apenas estes parâmetros apresentam P-value inferiores a 0,05, o que significa que os efeitos na variação da rugosidade devem-se em grande parte à umidade do gesso (Tabela 23).

Tabela 23 - Resultados ANOVA para rugosidade Rz

Efeitos principais:	Variações (somadas de quadrados)	Graus de liberdade	Desvios quadráticos médios	F-value	P-value	Contribuição %
Umidade [%]	571,199	1	571,199	178,260	0,0001	72,5
Vel. corte [m/min]	15,328	2	7,664	2,392	0,1033	1,1
Vel. avanço [mm/min]	2,210	2	1,105	0,345	0,7102	0,0
Profund. corte [mm]	3,340	2	1,670	0,521	0,5975	0,0
Umidade x Vel. corte	49,987	2	24,993	7,800	0,0013	5,6
Resíduo (erro)	140,989	44	3,204			20,8
Total	783,053	53				100,0

A umidade é responsável por 72,5% da resposta da rugosidade Rz. Já a interação umidade – velocidade de corte apresenta uma contribuição de 5,6%.

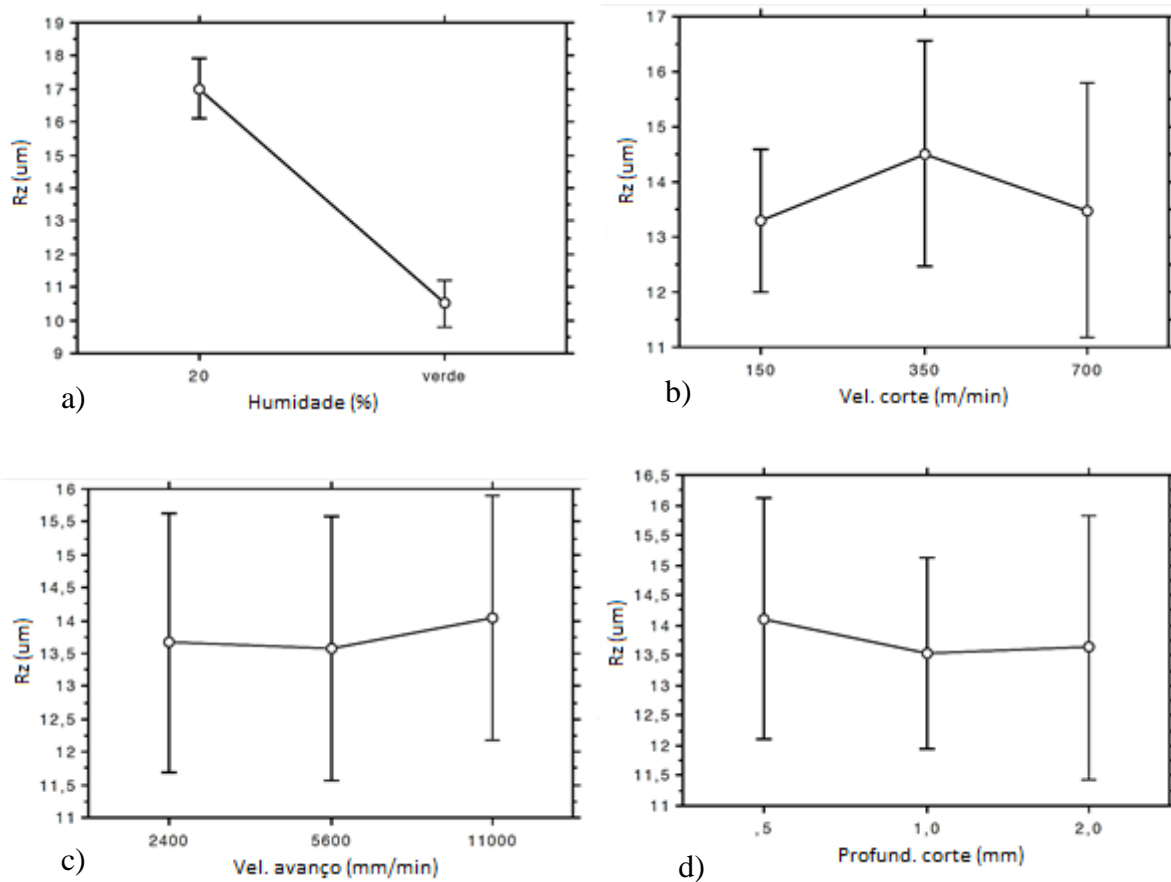


Figura 63 - Efeitos dos parâmetros na rugosidade Rz: a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte

À semelhança da análise para a rugosidade Ra, a análise da Figura 63 permite concluir que o aumento da humidade provoca grande diminuição da rugosidade Rz. Verifica-se uma redução de cerca de $7\mu\text{m}$ na rugosidade Rz quando se passa da maquinagem de um provete seco com 20% de humidade, aproximadamente, para um provete em estado verde.

Os restantes fatores são rejeitados estatisticamente para um intervalo de confiança de 95% e não é possível referir uma tendência de efeito na rugosidade com base nestes gráficos.

Os efeitos analisados na rugosidade Rz são em tudo semelhantes aos da rugosidade Ra. Do mesmo modo, verifica-se grande dispersão dos resultados e tal pode ter influenciado também a invalidação estatística dos efeitos dos parâmetros de corte na resposta rugosidade Rz.

A interação humidade – velocidade de corte (Figura 64) é estatisticamente relevante para a rugosidade Rz e o comportamento da interação é similar ao já analisado para Ra. Esta interação é mais notória entre 150 e 350 m/min do que entre 350 e 700 m/min. Assim, existe uma dependência superior entre os parâmetros para velocidades de corte inferiores, sendo que a rugosidade Rz verifica aumento com 20% de humidade e decréscimo em estado verde.

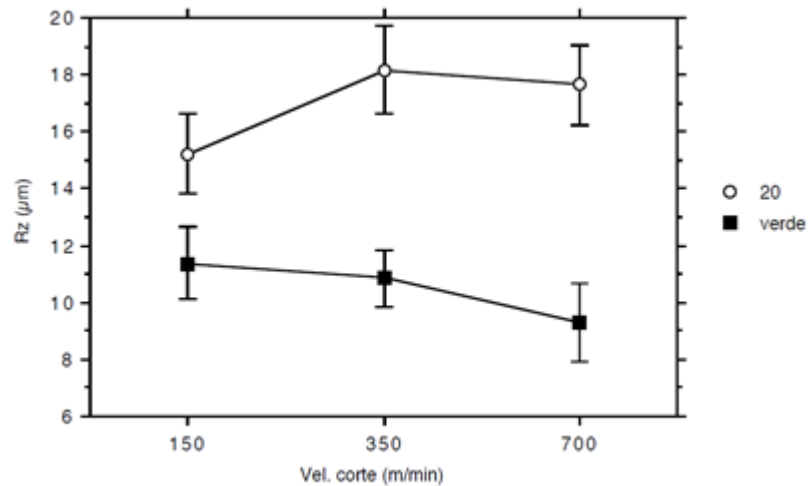


Figura 64 - Efeito da interação umidade – velocidade de corte na rugosidade Rz

4.2.6 ANOVA - Rugosidade, Rmax

À semelhança da análise para Ra e Rz, a análise para a rugosidade Rmax mostrou que todos os fatores estudados reprovam no valor de prova P-value, à exceção da umidade e da interação umidade – velocidade de corte. Apenas estes parâmetros apresentam um P-value inferior a 0,05, o que significa que os efeitos na variação da rugosidade devem-se em grande parte à umidade do gesso (Tabela 24).

Tabela 24 - Resultados ANOVA para rugosidade Rmax

Efeitos principais:	Variações (somadas de quadrados)	Graus de liberdade	Desvios quadráticos médios	F-value	P-value	Contribuição %
Umidade [%]	1096,622	1	1096,622	96,738	0,0001	61,9
Vel. corte [m/min]	41,108	2	20,554	1,813	0,1751	1,1
Vel. avanço [mm/min]	10,031	2	5,016	0,442	0,6453	0,0
Profund. corte [mm]	8,620	2	4,310	0,380	0,6860	0,0
Umidade x Vel. corte	98,263	2	49,131	4,334	0,0191	4,3
Resíduo (erro)	498,783	44	11,336			32,7
Total	1753,427	53				100,0

A umidade é responsável por 61,9% da contribuição nos efeitos da resposta da rugosidade Rmax. Enquanto a interação umidade – velocidade de corte apresenta uma contribuição de 4,3%.

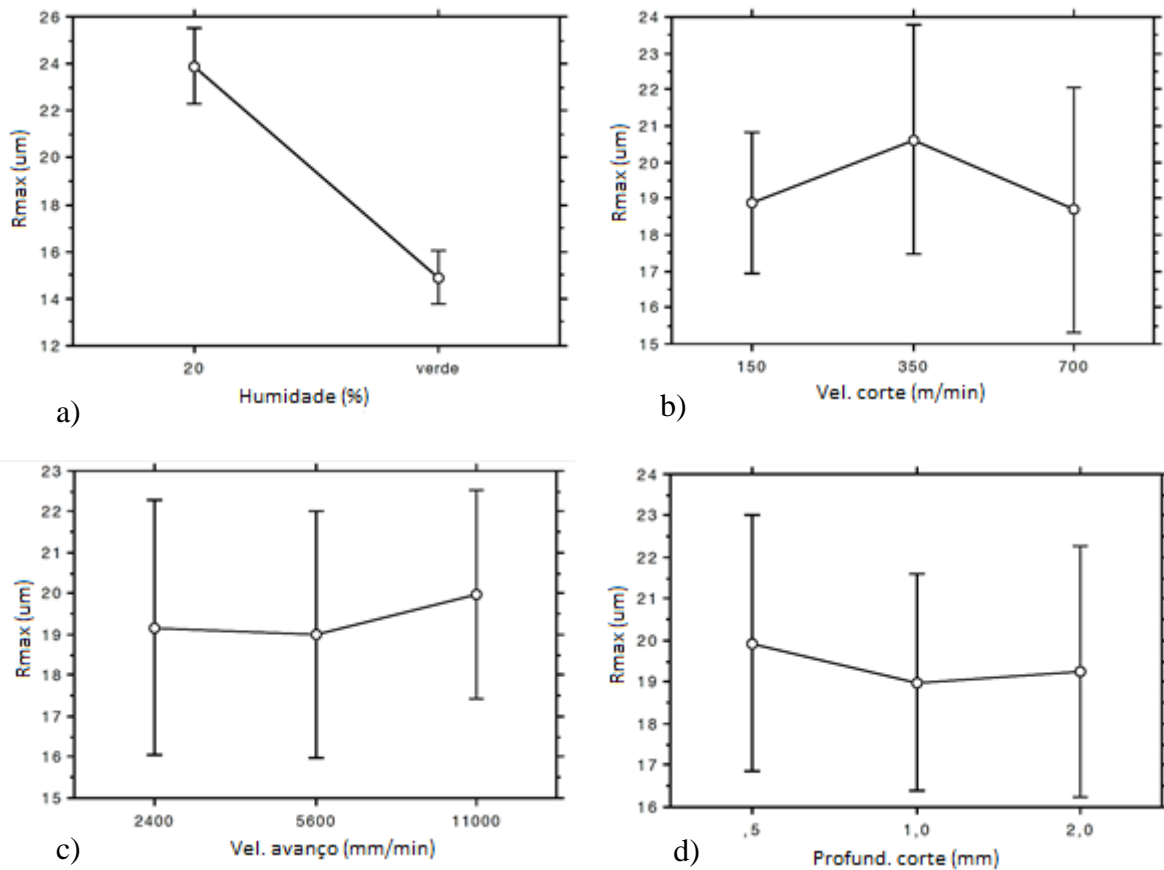


Figura 65 - Efeitos dos parâmetros na rugosidade R_{max} : a) humidade; b) velocidade de corte; c) velocidade de avanço; d) profundidade de corte

À semelhança da análise para a rugosidade R_a e R_z , a análise da Figura 65 permite concluir que o aumento da humidade provoca grande diminuição da rugosidade R_{max} . Verifica-se uma redução de cerca de $10\mu m$ na rugosidade R_{max} quando se passa da maquinagem de um provete seco com 20% de humidade, aproximadamente, para um provete em estado verde.

Os restantes fatores são rejeitados estatisticamente para um intervalo de confiança de 95% e não é possível referir uma tendência de efeito na rugosidade com base nestes gráficos.

Os efeitos analisados na rugosidade R_{max} são em tudo semelhantes aos da rugosidade R_a e R_z . Do mesmo modo, verifica-se grande dispersão dos resultados e tal pode ter influenciado também a invalidação estatística dos efeitos dos parâmetros de corte na resposta rugosidade R_{max} .

A interação humidade – velocidade de corte (Figura 66) é estatisticamente relevante para a rugosidade R_{max} e o comportamento da interação é similar ao já analisado para R_a e R_z . Esta interação é mais notória entre 150 e 350 m/min do que entre 350 e 700 m/min. Assim, existe uma dependência superior entre os parâmetros para velocidades de corte inferiores, sendo que a rugosidade R_{max} verifica aumento com 20% de humidade e decréscimo em estado verde.

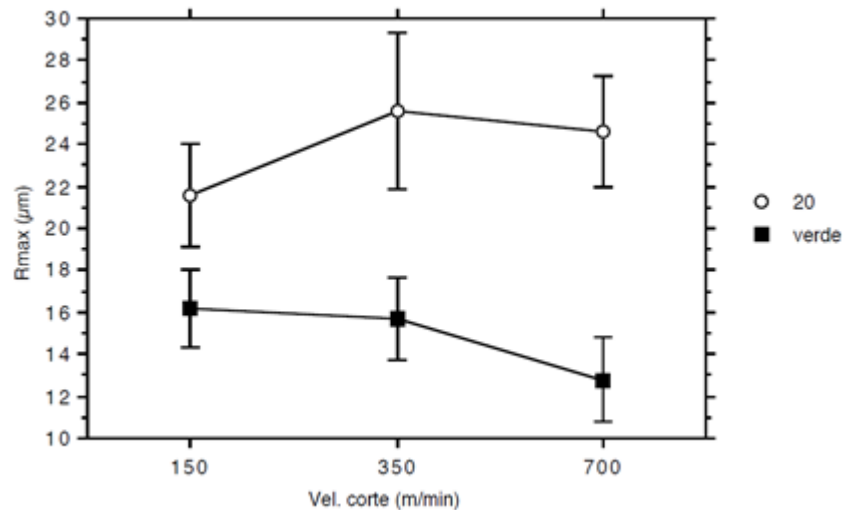


Figura 66 - Efeito da interação humidade – velocidade de corte na rugosidade Rmax

4.3 Desgaste da ferramenta

Para verificar a existência ou não de desgaste das pastilhas de WC, após maquinagem de provetes relativos aos testes Taguchi, foram realizadas medições de dimensões das pastilhas (Figura 67). Foram efetuadas cinco medidas para cada dimensão, antes e depois dos ensaios de maquinagem. Na Tabela 25 apresenta-se a variação de cotas medidas em milímetros e em percentagem, resultante da média das cinco medições efetuadas em cada análise das pastilhas.

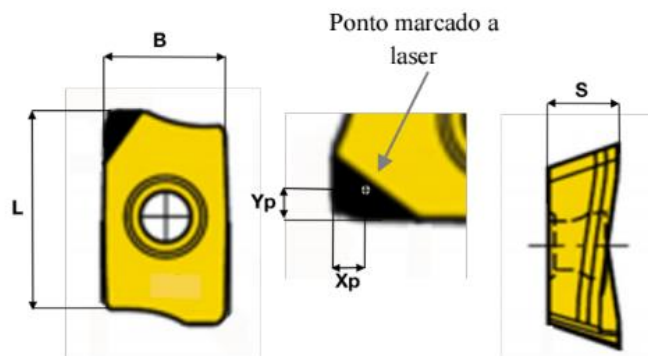


Figura 67 - Dimensões controladas nas pastilhas de WC

Tabela 25 – Variações registadas nas medições das pastilhas de WC para verificação de desgaste

Pastilha	B		L		Xp		Yp		S	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
1	-0,092	-1,41	0,584	5,10	-0,222	-9,01	0,047	1,65	0,009	0,25
2	0,114	1,72	0,504	4,32	-0,057	-2,18	0,217	7,58	-0,023	-0,66
3	0,035	0,54	0,630	5,38	-0,097	-3,74	0,056	2,03	-0,115	-3,44

A variação das dimensões das pastilhas registada corresponde essencialmente a erros de medição, uma vez que vários valores apresentados são negativos, representando um aumento de cotas, o que é impossível. Importa lembrar que as medições são feitas manualmente com auxílio de um microscópio, através do varrimento de coordenadas X e Y, sendo as medições efetuadas relativamente a um ponto de referência. No entanto, como se tratam de dimensões de baixa ordem de grandeza, qualquer desvio no posicionamento do cursor, ou da zona de medição que se pretende, provoca uma grande variação nas medições.

Para além disso, visualmente não se encontram vestígios de falhas no revestimento das pastilhas de WC, sendo que o revestimento tem uma espessura de aproximadamente 5µm. Isto indica a maquinagem do gesso não provocou desgaste nas pastilhas.

Ainda é possível comprovar este facto com base na bibliografia. Os valores de desgaste no flanco apontados para ferramentas de carbonetos revestidos variam entre 0 e 0,2 mm, com velocidades de corte entre 180 e 350 m/min e tempos de maquinagem entre 50 e 150 minutos [43]. Ora, calculando o tempo de maquinagem correspondente aos ensaios Taguchi é possível estimar o desgaste sofrido pelas pastilhas WC (Tabela 26).

$$\text{Tempo de maquinagem: } Tc = \frac{L}{f}$$

Comprimento de maquinagem: L = comp. do provete x nº de ensaios a vel. f x nº repetições

$$L = 160 \times 6 \times 3 = 2880 \text{ mm}$$

Tabela 26 – Tempos de maquinagem ensaios Taguchi

Velocidade de avanço, f (mm/min)	Tempo de maquinagem, Tc (min)
2400	1,20
5600	0,51
11000	0,26
Total	1,97

O tempo total de maquinagem de 1,97 minutos é bastante inferior aos tempos de maquinagem apresentados nos artigos científicos que estudam o desgaste da ferramenta [42, 43]. Assim, considera-se que para os ensaios Taguchi realizados, com tempo total de maquinagem de aproximadamente 2 minutos, não existiu desgaste das pastilhas de WC.

Não foi possível verificar a existência de desgastes nas pastilhas de PCD, devido a um acidente na máquina CNC Checkbox 1008 que provocou a queda da fresa sobre a mesa de trabalho, danificando as pastilhas de PCD. No entanto, à semelhança da análise feita para as pastilhas de WC, o tempo total de maquinagem, no caso das pastilhas de PCD, também é

bastante inferior aos tempos de maquinagem apresentados nos artigos científicos que estudam o desgaste da ferramenta. Para além disso, o PCD é um material de dureza superior ao WC (Ultra duro), logo tendo por base os resultados de desgaste obtidos para WC, considera-se que as pastilhas de PCD também não sofreram desgaste provocado pela maquinagem do gesso.

4.4 Comparação de resultados com máquinas e ferramentas diferentes

O trabalho experimental que consta neste relatório foi realizado essencialmente em duas partes, a primeira fase de ensaios com uma matriz de ensaios correspondendo a um fatorial completo e a segunda fase de ensaios com uma matriz de ensaios definida com o método de Taguchi. Como já referido anteriormente, a primeira fase de ensaios foi realizada na máquina CNC Checkbox 1008, da OUPLAN CNC Routers, com pastilhas PCD. A segunda fase de ensaios foi realizada na fresadora CNC de 5 eixos, da TECMACAL Industrial Solutions, com pastilhas de WC revestidas.

Posto isto, pretende-se fazer uma comparação dos resultados de esforços (Tabela 28) e acabamentos superficiais (Tabela 29) relativa a ensaios que foram repetidos em ambas as máquinas e com as ferramentas diferentes (Tabela 27).

Tabela 27 – Parâmetros de corte usados nos ensaios para comparação de máquinas e ferramentas

Ensaio	h (%)	Vc (m/min)	f (mm/min)	ap (mm)
1	20	150	2400	0,5
2	20	150	5600	1
3	20	150	11000	2
4	20	350	2400	0,5
5	20	350	5600	1
6	20	350	11000	2

A análise dos valores médios dos esforços medidos em ensaios semelhantes mas em máquinas diferentes e com pastilhas diferentes mostra que na máquina CNC de 5 eixos com pastilhas de WC (Tabela 28), geralmente, as forças F_x são ligeiramente superiores, F_y inferiores e F_z superiores relativamente à máquina CNC Checkbox 1008 com pastilhas PCD. No entanto as diferenças nos esforços entre máquinas são muito pequenas entre 0 e 5,98 N para F_x , entre 0,02 e 3,8 N para F_y e entre 0,06 e 3,61 N para F_z .

Tabela 28 – Comparação de forças de corte obtidas em máquinas diferentes e com pastilhas diferentes

	CNC Checkbox 1008 com pastilhas PCD			CNC de 5 eixos com pastilhas de WC			Variação dos esforços		
	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _x (%)	F _y (%)	F _z (%)
1	1,37	0,58	0,58	1,60	0,45	0,76	16,8	-22,4	31,0
2	4,55	1,73	1,12	5,40	1,71	1,92	18,7	-1,2	71,4
3	16,97	9,05	3,39	22,95	12,85	7,00	35,2	42,0	106,5
4	0,83	0,45	0,35	0,83	0,31	0,41	0	-31,1	17,1
5	3,09	1,52	0,53	3,41	1,42	1,06	10,4	-6,6	100,0
6	10,96	5,16	0,58	9,97	4,57	1,30	-9,0	-11,4	124,1

O ensaio que melhor exprime as diferenças que podem ocorrer é o ensaio 3, devido às suas condições de corte mais agressivas, com velocidade de corte baixa, mas velocidade de avanço e profundidade de corte elevados. Focando este ensaio, percebe-se claramente um aumento das forças de corte na máquina CNC de 5 eixos com pastilhas de WC. Tal pode ser justificado pelo facto das pastilhas de WC terem diferenças geométricas e físicas em relação às pastilhas de PCD, o que pode provocar esta variação nos esforços causados durante o corte de material. O facto da força F_z, neste caso aumentar para o dobro fortifica a ideia de que as diferenças se devem ao tipo de pastilhas. É de salientar ainda que, como os esforços resultam de valores médios de medições efetuadas no decorrer da maquinagem.

Tabela 29 - Comparação de rugosidades obtidas em máquinas diferentes e com pastilhas diferentes

	CNC Checkbox 1008 com pastilhas PCD			CNC de 5 eixos com pastilhas de WC			Variação das rugosidades		
	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)	R _a (%)	R _z (%)	R _{max} (%)
1	3,28	18,02	25,04	3,24	16,77	22,99	-1,2	-6,9	-8,2
2	4,01	20,28	28,56	3,04	15,26	20,60	-24,2	-24,8	-27,9
3	4,00	18,78	26,06	2,92	13,63	21,04	-27,7	-27,4	-19,3
4	3,37	18,73	25,93	3,38	18,04	26,33	0,3	-3,7	1,5
5	3,55	18,71	24,95	3,18	16,82	23,76	-10,4	-10,1	-4,8
6	4,16	19,77	27,31	3,70	19,66	26,60	-11,1	-0,6	-2,6

A análise dos valores médios das rugosidades medidas em ensaios semelhantes, mas em máquinas diferentes e com pastilhas diferentes mostra que na máquina CNC de 5 eixos com pastilhas de WC (Tabela 29), geralmente, as rugosidades R_a , R_z e R_{max} são ligeiramente inferiores, relativamente à máquina CNC Checkbox 1008 com pastilhas PCD. No entanto, as diferenças nas rugosidades entre máquinas são pequenas entre 0,01 e 1,08 μm para R_a , entre 0,69 e 5,15 μm para R_z e entre 2,05 e 7,96 μm para R_{max} .

Na máquina CNC de 5 eixos verificam-se, geralmente, rugosidades inferiores. Isto pode ser explicado por esta ser uma máquina de maiores dimensões, mais estável e também sujeita a menores vibrações. Durante o trabalho experimental foi possível observar que o deslocamento do cabeçote da máquina CNC de 5 eixos provocava menos vibrações e menor ruído do que o deslocamento da máquina CNC Checkbox 1008. Assim, a maior estabilidade da máquina nas mesmas condições de corte pode ter como consequência o melhor acabamento superficial dos provetes.

De notar ainda que erros de medições podem ter afetado os resultados obtidos, principalmente nas rugosidades devido à dispersão de resultados obtida e ao método de medição.

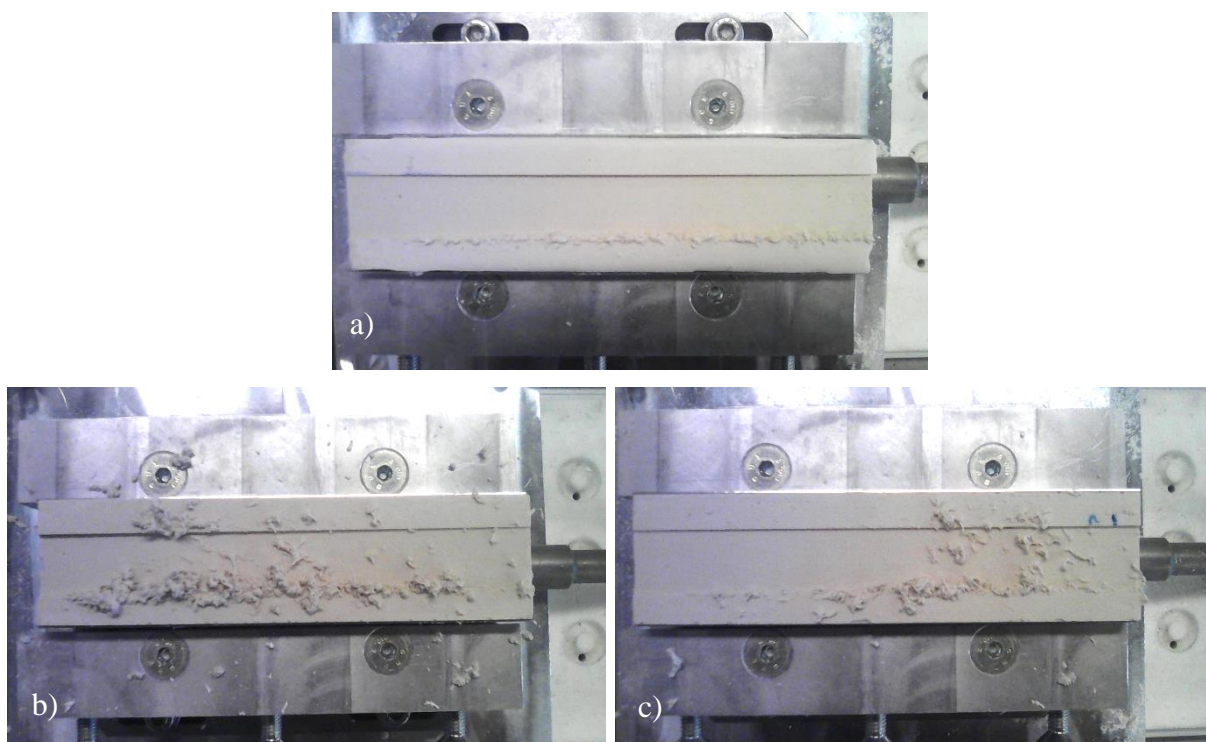
4.5 Ensaios complementares de maquinagem

No decorrer dos trabalhos experimentais foram surgindo questões diversas quanto ao comportamento do gesso quando maquinado sob determinadas condições. Por isso, foram realizados alguns ensaios adicionais, meramente exploratórios, tendo como principal objetivo definir algumas limitações do processo, estudando outros aspetos também importantes na maquinagem de gesso para além dos parâmetros de corte.

4.5.1 Maquinagem em verde

Esta dissertação insere-se no âmbito do projeto ADIMAQ, que tem como um dos objetivos o fabrico híbrido de moldações em gesso. Idealmente, o fabrico híbrido de uma moldação, que consiste em fabrico aditivo seguido de maquinagem, deveria ser possível em pouco tempo, isto é, com processamento consecutivo do material. No entanto, do processo de adição resulta uma peça em verde, com material num estado “pastoso”, que à partida é muito difícil maquinar. Esta dificuldade prende-se sobretudo com o estado do gesso que adere facilmente à ferramenta de corte e às superfícies já maquinadas.

Assim, para perceber o tempo mínimo de secagem do gesso que permite uma maquinagem eficaz, realizaram-se alguns testes com gesso em verde. Foram realizados testes entre 40 minutos e 2 horas após o vazamento do material, com a aplicação de vários parâmetros de corte. Em todos os casos se verificou formação de “apara aderente” (Figura 68), sendo que o material aderiria bastante à ferramenta e ao próprio provete. Como o gesso nesta fase já não reage quimicamente, permite a remoção da apara formada. No entanto, a remoção eficaz da apara da superfície do provete não era fácil devido ao estado físico de material.



Figuras 68 – Maquinagem em verde, evidência de formação de apara aderente ao provete: a) tempo de secagem = 40min, $V_c = 700$ m/min, $f = 11000$ mm/min; b) tempo de secagem = 60min, $V_c = 700$ m/min, $f = 8000$ mm/min; c) tempo de secagem = 50min, $V_c = 150$ m/min, $f = 2400$ mm/min

A observação do fenómeno de formação da apara permitiu perceber que esta é projetada em determinada direção, ficando acumulada maioritariamente numa das arestas do canal maquinado (Figura 69). Na Figura 68, o lado inferior do provete é sempre o que apresenta maior quantidade de apara de gesso. Isto indica que numa situação de acabamento exterior de uma peça em gesso, é possível maquinar o gesso em verde com tempos de secagem inferiores a duas horas. No entanto, a trajetória de corte e o sentido de rotação da fresa têm de ser planeados de modo a que a projeção de apara aconteça para o exterior da peça, evitando adesão de gesso à peça que está a ser maquinada.

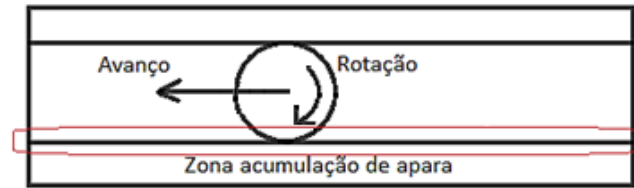


Figura 69 – Representação do sentido de rotação e avanço da fresa e da zona de acumulação de apra de gesso

4.5.2 Testes de espessura de parede

Uma das especificações técnicas das moldações em gesso, para a indústria de cerâmica sanitária, é que estas possam ter zonas com espessuras mínimas de 5 mm. Ora, este requisito deu origem ao estudo sobre a possibilidade de maquinagem de paredes em gesso com a espessura mínima especificada. Uma das principais preocupações prende-se com a fragilidade do gesso quando seco. Foram aplicados vários conjuntos de parâmetros de corte ($V_c = 150$; 350 ; 700 m/min, $f = 2400$; 5600 ; 11000 mm/min e $a_p = 2$ mm) e em todos os testes se obtiveram paredes integras até uma altura máxima de 10 mm (Figura 70).



Figura 70 – Maquinagem de paredes de espessura 5 mm

4.5.3 Qualidade de arestas vivas

Para além da qualidade da superfície maquinada analisada com medição de rugosidades, importa também estudar a qualidade das arestas vivas produzidas no gesso consoante os parâmetros de corte aplicados. Assim, realizaram-se alguns testes que consistiram na maquinagem de três canais transversais nos provetes estáveis à temperatura ambiente, para além do canal longitudinal, desfasados 90° .

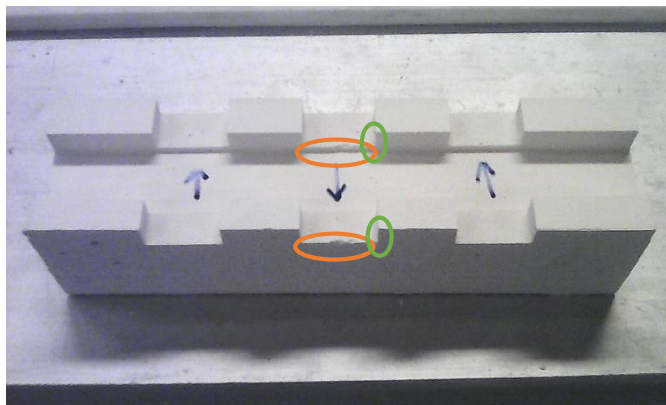


Figura 71 – Provete com indicação de zonas onde as arestas quebram

Nestes testes foram aplicados vários conjuntos de parâmetros de corte ($V_c = 150; 350; 700$ m/min, $f = 2400; 5600; 11000$ mm/min e $a_p = 2; 1; 0,5$ mm) e constatou-se que as arestas dos canais maquinados quebram do lado de saída da ferramenta. Também se verificou que quebram as arestas verticais do lado direito (indicadas a verde na Figura 71) e de saída da ferramenta (indicadas a laranja na Figura 71). As setas marcadas no provete (Figura 71) indicam o sentido de avanço da ferramenta. O lado de quebra da aresta está relacionado com o sentido de rotação da fresa, sendo que as quebras se verificam na saída da ferramenta. No entanto, a diminuição da profundidade de corte e o aumento da velocidade de corte conduzem à diminuição dos danos causados nas arestas na zona de saída da ferramenta.

4.5.4 Maquinagem de molde obtido por fabrico aditivo

Este estudo da maquinabilidade do gesso está associado à possibilidade de fabrico híbrido de moldes e moldações em gesso. Deste modo, um dos testes adicionais realizados consistiu na maquinagem de uma peça obtida através de fabrico aditivo (Figura 72). A pasta de gesso é preparada e colocada no depósito do cabeçote de extrusão da máquina. A deposição de material ocorre camada sobre camada. Previamente, em *software* próprio, são programadas as trajetórias de deposição e definidos os parâmetros de extrusão, como velocidade de avanço, velocidade de extrusão e espaçamento entre camadas.

A maquinagem da peça molde ocorreu 6 horas após a sua extrusão, na máquina CNC de 5 eixos. Primeiro, foi realizado o facejamento da superfície superior da peça com uma fresa adequada de 100 mm de diâmetro. Depois, foi maquinado o contorno exterior do molde, seguido do contorno interior. Para estas operações foi usada uma fresa de 20 mm de diâmetro e foram aplicadas velocidades de avanço na ordem dos 6000 mm/min e velocidades de corte na ordem dos 750 m/min.

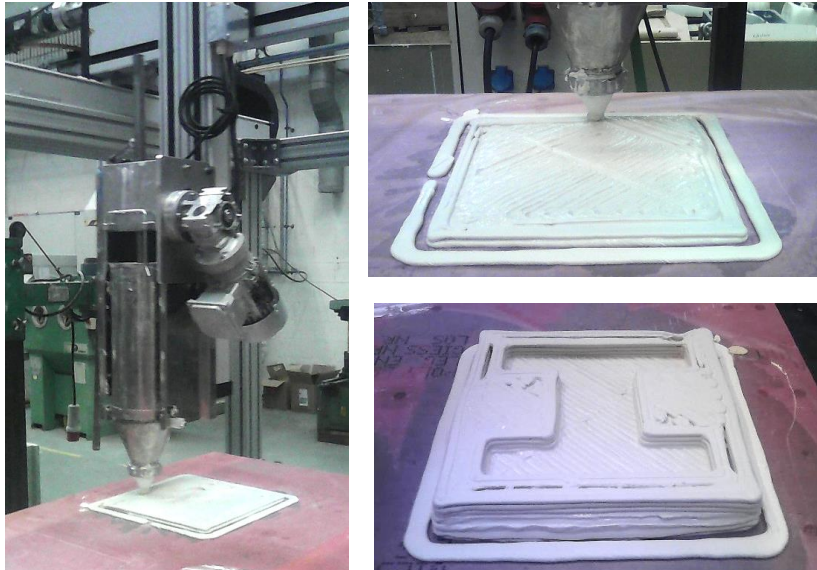


Figura 72 – Processo de fabrico aditivo de molde em gesso

Importa salientar que estes testes foram realizados em paralelos com os estudos de maquinabilidade de gesso já apresentados nesta dissertação. Por este motivo, os parâmetros de corte e o tempo de secagem do material usados não correspondem às gamas de parâmetros e resultados obtidos nos estudos desenvolvidos.



Figura 73 – Peça molde maquinada

As operações de facejamento e fresagem do contorno exterior da peça não apresentaram problemas de execução nem de qualidade, perante as expectativas existentes. No entanto, a execução do contorno exterior revelou dificuldades na adequada maquinagem de algumas zonas, como cantos. Verificou-se uma grande acumulação de material nas arestas internas devido à projeção de aparas de gesso (Figura 73).

É de salientar que o molde, 6 horas após sua produção por fabrico aditivo, ainda se encontrava num estado que pode ser considerado verde, uma vez que a sua aparas aderiu facilmente à ferramenta e à própria peça. Verificou-se que quanto maior a profundidade de corte aplicada, mais se destacavam os problemas relacionados com o estado físico do material. Tal era esperado uma vez que o processo de secagem do material ocorre da superfície para o interior.

Estes resultados vêm corroborar os estudos desenvolvidos acerca da maquinabilidade de gesso, uma vez que se confirma que 6 horas de secagem não é suficiente para permitir a maquinagem do gesso sem adesão da peça às superfícies da peça. Este problema é mais acentuado na maquinagem de cavidades.

5 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação permitiu aferir algumas conclusões acerca do comportamento do gesso, da sua maquinabilidade e da influência da variação dos parâmetros do processo nas forças de maquinagem e no acabamento superficial. As principais conclusões são apresentadas seguidamente:

- A secagem de gesso em forno a 110°C, por um período igual ou superior a dois dias, resulta em provetes com teor de humidade de 0%;
- A secagem de gesso em sala com temperatura controlada de 20±2°C, por um período igual ou superior a quatro dias, resulta em provetes com teor de humidade de 20%;
- O método de secagem do gesso altera as suas condições de equilíbrio com o meio ambiente, sendo que a secagem de gesso em forno a 110°C, por um período igual ou superior a dois dias, com posterior estabilização à temperatura ambiente a 20±2°C, resulta em provetes com teor de humidade de 8%;
- O gesso seco apresenta comportamento frágil, mais pronunciado quando o teor de humidade do material é muito baixo, ou seja quando este é sujeito a secagem em forno;
- As forças de corte na maquinagem de gesso são muito baixas quando comparadas genericamente às forças de corte em metais - forças máximas cerca de 15N;
- Intensidade das forças de corte é $F_x > F_y > F_z$, sendo F_x a força na direção perpendicular ao avanço, F_y na direção do avanço e F_z na direção do penetramento;
- Forças F_x e F_y são mais afetadas pela velocidade de avanço e profundidade de corte - maior velocidade de avanço e/ou profundidade de corte causam maiores forças de corte;
- A influência do teor de humidade nas forças de maquinagem é reduzida;
- A rugosidade (R_a) é sempre inferior a 4µm - pode ser otimizada, mas para estas aplicações não é necessário;
- A rugosidade média obtida foi inferior à esperada para moldes em gesso, entre 8 e 10 µm;
- As rugosidades obtidas são baixas, mas há que ter em conta que os ensaios realizados consistiram apenas em operações de fresagem de topo. Caso se fizessem testes de maquinagem de superfícies curvas, haveria um efeito de escada devido à profundidade de corte que se traduziria numa rugosidade superficial superior;
- Os efeitos das variáveis do processo na rugosidade são semelhantes para R_a , R_z e R_{max} ;
- A rugosidade é fortemente afetada pelo teor de humidade - maior teor de humidade causa menor rugosidade, possibilitando melhor acabamento superficial;

- O efeito da variação dos parâmetros de corte na rugosidade é desprezável, não se registrando significativas alterações da qualidade superficial com a variação destes;
- A humidade é o único fator que influencia a rugosidade superficial. Os resultados demonstram que para o gesso verde podem ser obtidos valores de rugosidade inferior comparativamente com provetes com 20% de humidade, para os mesmos parâmetros de corte;
- Contatou-se grande dispersão de resultados para rugosidades, o que pode ter causado a rejeição estatística dos efeitos dos fatores de corte para um intervalo de confiança de 95%;
- A interação humidade - velocidade de corte é mais pronunciada para velocidades de corte mais baixas;
- A maquinagem em verde é difícil devido à formação de apara aderente e à sua acumulação na ferramenta;
- A maquinagem de paredes com espessura de 5mm resultou em paredes sólidas com uma altura de 10mm para várias combinações dos parâmetros de corte;
- A maquinagem transversal revelou quebra de arestas vivas na zona de saída da ferramenta – o aumento das velocidades de corte e de avanço aliado à diminuição da profundidade de corte minimiza este problema;
- É possível maquinar gesso em verde, com tempos de secagem inferiores a duas horas, em situação de acabamento exterior. No entanto, a trajetória de corte e o sentido de rotação da fresa têm de ser planeados de modo a que a projeção de apara aconteça para o exterior, evitando adesão de gesso à peça.

No seguimento deste trabalho, seria interessante realizar outros trabalhos de investigação, nomeadamente:

- Realizar testes de maquinagem para outras formulações de gesso;
- Realizar testes com gesso aditivado, nomeadamente com diferentes adições de superplastificante, pois as condições de corte deverão ser substancialmente diferentes;
- Efetuar nova análise ANOVA usando em alternativa à velocidade de avanço, o avanço por dente, por este ser um parâmetro independente da velocidade de corte;
- Aplicar o método Taguchi para estudar interações entre outras variáveis do processo;
- Executar ensaios de maquinagem em peças de grandes dimensões, com geometrias complexas, tanto para validação da obtenção de peças reais e funcionais para aplicação

industrial pretendida, como para o estabelecimento de limitações do processo produtivo que se pretende implementar;

- Estudar e aplicar de sistemas de aspiração e de sopro eficientes que possam ser utilizados conjuntamente com trajetórias de maquinagem otimizadas de modo a minimizar a adesão do material quando se pretende maquinar em verde;
- Estudar de sistemas de secagem rápida, tipo infravermelhos;
- Simular a maquinagem em gesso através de técnicas “*material point method*”, isto é, discretizando o domínio em partículas, com *software* apropriado;
- Efetuar ensaios para determinar a resistência do material ao corte;
- Usar modelo mecanístico (analítico) para previsão de esforços de corte e desgaste de ferramentas.

Referências

- [1] “INEGI,” *A Instituição* [Online]. Disponível em: <http://www.inegi.pt/instituicao.asp?idm=1&idsubm=5&LN=>. [Acedido em Março 2017].
- [2] “CEI by Zipor,” *Company* [Online]. Disponível em: <http://www.ceigroup.net/company/> [Acedido em Março 2017].
- [3] “FERESPE,” *Empresa* [Online]. Disponível em: <http://ferespe.com/company/?lang=pt-pt>. [Acedido em Março 2017].
- [4] D. E. Caetano, “Desenvolvimento de Formulações de Pastas de Gesso para Fabrico Aditivo,” Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, 2016.
- [5] K. Richard, *Gypsum: Connecting Science and Technology*, ASTM International, 2009.
- [6] J. C. O. Nunes, “Fabrico de peças metálicas utilizando moldações cerâmicas e moldações em areia,” Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, 1999.
- [7] C. A. Harper, *Handbook of Ceramics, Glasses and Diamonds*, McGraw-Hill, 2001.
- [8] D. Caetano, J. Alves, R. Neto e T. Duarte, “Development of Plaster Mixtures Formulations for Additive Manufacturing,” *Materials Design and Applications*, Lucas da Silva, Springer International Publishing, 2017, pp. 257-277.
- [9] N. B. Singh e B. Middendorf, “Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization,” *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, vol. 53, pp. 57-77, 2007.
- [10] A. Pundir, M. Garg e R. Singh, “Evaluation of properties of gypsum plaster-superplasticizer blends of improved performance,” *Journal of Building Engineering*, vol. 4, pp. 223-230, 2015.
- [11] T. J. Coole, D. G. Cheshire, D. Newman e D. K. Harrison, “Excessive tool wear and moisture content in ceramic plaster machining,” *British Ceramic Transactions*, vol. 98, pp. 151-154, 1999.
- [12] I. A. Ferreira, “Impressão tridimensional de baixo custo aplicada à pasta de açúcar,” Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, 2015.
- [13] P. Padevĕt, P. Tesárek e T. Plachý, “Evolution of mechanical properties of gypsum in time,” *International Journal of Mechanics*, vol. 5, pp. 1-9, 2011.

- [14] INEGI, “Projeto ADIMAQ - Proposta de candidatura - Parte B (Anexo Técnico), Documento interno,” Porto, 2015.
- [15] “Mechanical Engineering,” *Plaster mould casting* [Online]. Disponível em: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/wp-content/uploads/2012/02/01-ceramic-mould-casting-ceramic-moulding-processes-ceramic-mold-making.jpg>. [Acedido em Março 2017].
- [16] “Formula Saint-Gobain,” *Slip casting* [Online]. Disponível em: <http://www.saintgobainformula.com/usages/slip-casting>. [Acedido em Março 2017].
- [17] “AM - Module Terminology,” [Online]. Disponível em: http://www.materialseducation.org/educators/matedu-modules/docs/AM_Module-Terminology.pdf. [Acedido em Fevereiro 2017].
- [18] “Wohlers Associates,” [Online]. Disponível em: <https://wohlersassociates.com/additive-manufacturing.html>. [Acedido em Fevereiro 2017].
- [19] “3D Printing Industry,” [Online]. Disponível em: <http://3dprintingindustry.com/>. [Acedido em Fevereiro 2017].
- [20] SIMT, “SIMT AM Conference,” Disponível em: http://simt.com/uploads/4881/SIMT_AM_Conference_Keynote.pdf.
- [21] A. International, “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies - Designation: F2792 – 12a,” 2013.
- [22] “Forbes,” *Tech* [Online]. Disponível em: <http://www.forbes.com/sites/louisocolumbus/2015/03/31/2015-roundup-of-3d-printing-market-forecasts-and-estimates/#21cdf2d21dc6>. [Acedido em Fevereiro 2017].
- [23] “The Motley Fool,” [Online]. Disponível em: <http://www.fool.com/investing/general/2014/09/09/why-3d-printing-stocks-could-have-a-tremendous-run.aspx>. [Acedido em Fevereiro 2017].
- [24] P. Silva, “Desenvolvimento de um sistema de extrusão de pastas de gesso para fabrico aditivo,” Porto, 2017.
- [25] T. Caffrey e T. Wohlers, “Additive manufacturing state of the industry,” *Manufacturing Engineering*, vol. 154, pp. 67-78, 2015.

- [26] X. Lu, Y. Lee, Y. S., Y. Haob, J. Evans e C. Parini, “Solvent-based paste extrusion solid freeforming,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, pp. 1-10, 2010.
- [27] “3D Systems,” [Online]. Disponível em: <https://www.3dsystems.com/>. [Acedido em Fevereiro 2017].
- [28] “EnvisionTEC,” *3D Printers - Perfactory* [Online]. Disponível em: <https://enviontec.com>. [Acedido em Março 2017].
- [29] M. V. S. Casagrande, “Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM,” Dissertação, Rio de Janeiro, 2013.
- [30] B. R. Raulina, “Manufatura aditiva: Desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (Modelagem Por Fusão e Deposição),” Brasília, 2011.
- [31] “Custompart.net,” *Processes - FDM* [Online]. Disponível em: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>. [Acedido em Março 2017].
- [32] L. J. Love e C. Duty, “Cincinnati Big Area Additive Manufacturing (BAAM) - CRADA Final Report NFE-14-04957,” Oak Ridge National Laboratory, 2015.
- [33] “Cincinnati,” *Additive manufacturing - BAAM* [Online]. Disponível em: <https://www.e-ci.com/baam>. [Acedido em Fevereiro 2017].
- [34] “Craft,” *Contour Crafting* [Online]. Disponível em: <http://www.craft-usc.com/>. [Acedido em Março 2017].
- [35] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes, and Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [36] J. P. Davim, *Princípios da Maquinagem*, Publindústria, 2008.
- [37] T. J. Coole, J. F. C. P. Antunes Simões, D. G. Cheshire e M. D. Ruy Mesquita, “Analysis of CNC machining technology in production of plaster moulds,” *British Ceramic Transactions*, vol. 100, pp. 134 - 139, 2001.
- [38] T. J. Coole, D. G. Cheshire, R. M. D. Mesquita e J. F. C. P. Antunes Simões, “Analysis of robot system capabilities in machining of full scale prototypes for sanitary ware industry,” *British Ceramic Transactions*, vol. 99, pp. 175 - 178, 2000.
- [39] “Data Clay,” [Online]. Disponível em: <http://data-clay.org/projects/Tectonic%20Horizons/index.html>. [Acedido em Março 2017].

- [40] “Phoenix Control Sístems Lda.,” [Online]. Disponível em: <https://phoenixrobotic.wordpress.com/2016/10/10/can-robot-milling-replace-a-traditional-cnc-machine/>. [Acedido em Março 2017].
- [41] “AFS,” [Online]. Disponível em: <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=6915>. [Acedido em Junho 2011].
- [42] J. Simões, T. Coole, D. Cheshire e R. Mesquita, “The analysis of tool wear in the machining of plaster material prototypes,” *ISATA, Automotive & Transportation Technology*, pp. 149-156, 2000.
- [43] T. J. Coole, J. Antunes Simões, A. Pires e D. Cheshire, “Development of a tool life prediction model for plaster machining,” *Int. J. Agile Systems and Management*, vol. 2, pp. 186 - 204, 2007.
- [44] “Hermle,” [Online]. Disponível em: <http://www.hermle-generativ-fertigen.de/cms/en/technology/>. [Acedido em Março 2017].
- [45] “DMG MORI,” *Technology – Ultrasonic/Lasertec* [Online]. Disponível em: <http://en.dmgmori.com>. [Acedido em Março 2017].
- [46] Siemens, “Siemens,” [Online]. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com>. [Acedido em Maio 2017].
- [47] “Custompart.net,” *Processes – Milling* [Online]. Disponível em: <http://www.custompartnet.com/wu/images/milling/axial-depth-mill.png>.
- [48] “OUPLAN,” [Online]. Disponível em: <http://www.ouplan.net/pt/CHECKBOX.html>. [Acedido em Maio 2017].
- [49] “TECMACAL - Optima,” [Online]. Disponível em: <http://www.optima.cloud/produtos/cnc/serie-aco/>. [Acedido em Junho 2017].
- [50] “SANDVIK,” [Online]. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com>. [Acedido em Maio 2017].
- [51] J. Luo, H. Ding e A. J. Shih, “Induction-heated tool machining of elastomers – Part 2: Chip morphology, cutting forces and machined surfaces,” *Machining Science and Technology*, vol. 9, pp. 567 – 588, 2005.
- [52] S. Morais, *Desenho Técnico Básico 3*, Porto: Gráfico Reunidos, Lda, 2007.
- [53] [Online]. Disponível em: http://granat-e.ru/images/devices/t500_1.jpg.

- [54] “Minitab,” [Online]. Disponível em: <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/taguchi-designs/taguchi-designs/>.

ANEXO A: Ensaios preliminares de maquinagem

Com o objetivo de compreender o comportamento do gesso durante o seu processo de maquinagem, bem como a influência dos parâmetros de corte escolhidos no acabamento da superfície, foram realizados testes preliminares de maquinagem em gesso sem aditivos. Para tal, foi usado um bloco de gesso (aprox. 400x600mm), já existente no INEGI. Os testes foram realizados na fresadora CNC de 5 eixos.

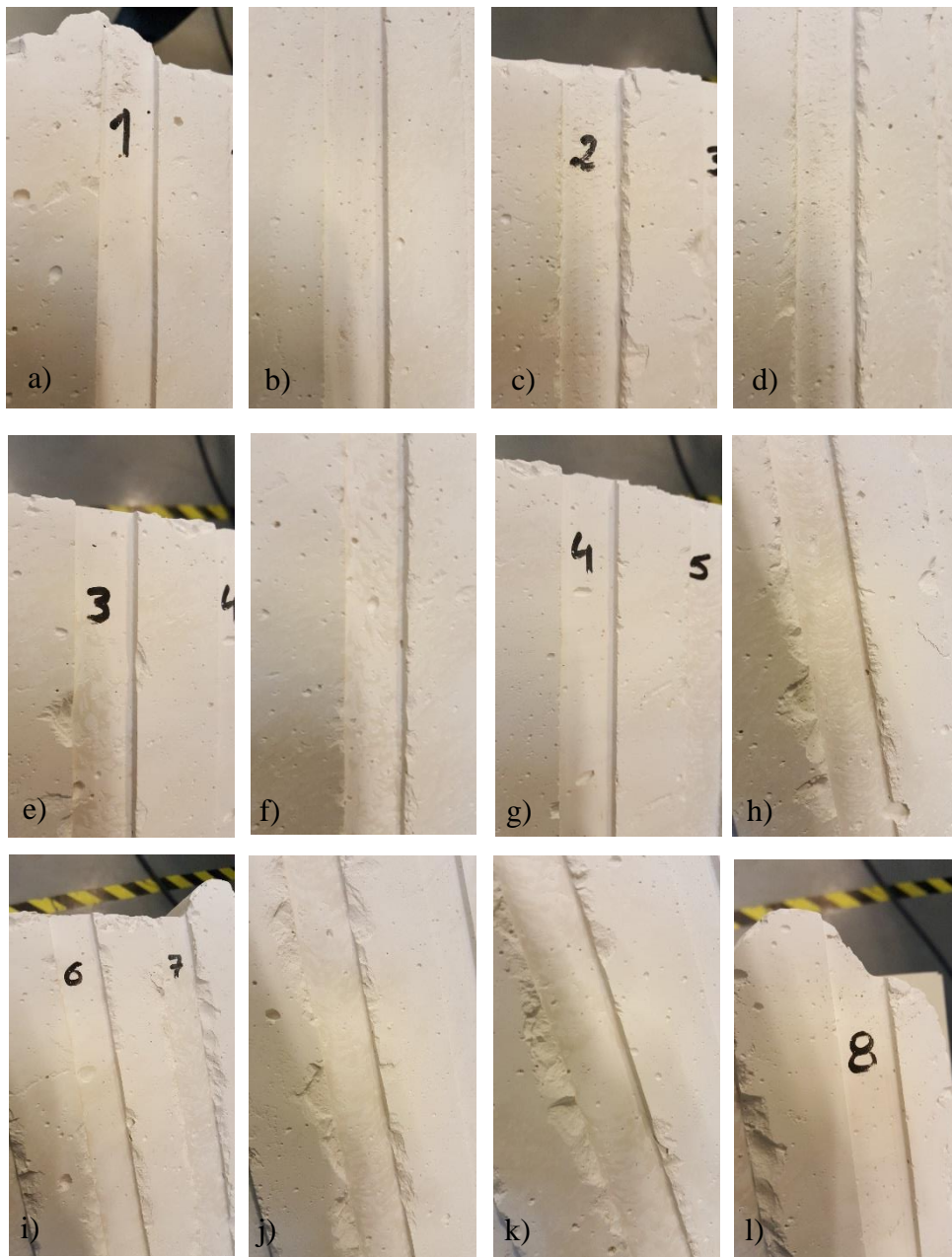
Foi construída uma matriz de ensaios com parâmetros de corte arbitrados, nomeadamente velocidade de rotação, velocidade de avanço e profundidade de corte, apresentada na Tabela 30, de forma a fazer um varrimento de uma vasta gama destes parâmetros.

Tabela 30 – Parâmetros de corte dos ensaios preliminares de maquinagem

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8
Vel. Rotação, n (rpm)	1000	1000	8000	8000	6000	16000	16000	8000
Vel. de corte, Vc (m/min)	62,83	62,83	502,65	502,65	1005,31	1005,31	1005,31	502,65
Vel. de avanço, f (mm/min)	1000	6000	1000	6000	1000	6000	3000	3000
Profundidade de corte, ap (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2

Optou-se por maquinar 8 canais ao longo do bloco de gesso, com uma ferramenta do tipo fresa cilíndrica de ponta plana em HSS de diâmetro 20 mm com três arestas de corte, devido à facilidade e rapidez deste tipo de operação, não sendo necessário um programa CAD/CAM específico. Cada canal foi executado com os parâmetros correspondentes e com duas passagens da ferramenta.

Efetuada a maquinagem dos canais, observaram-se os seguintes resultados em termos de execução de arestas vivas e qualidade superficial dos canais.



Figuras 74 - Resultados dos ensaios preliminares de maquinagem

Na Figura 74 apresenta-se uma visão geral dos resultados obtidos com os ensaios de maquinagem. Os canais que apresentaram melhor acabamento e arestas vivas foram os canais 1 e 8, seguidos dos canais 3 e 4. Os piores resultados verificaram-se claramente nos canais 5 e 7, com grandes quantidades de material arrancado. A fraca qualidade do bloco de gesso maquinado, por apresentar grande quantidade de poros e poros de grandes dimensões, pode ser comprometido e influenciado estes resultados.

Para melhor avaliar a qualidade superficial das zonas maquinadas, efetuou-se a medição de rugosidades em cada canal. A Figura 75 mostra a evolução da rugosidade média da superfície Ra com a variação da velocidade de corte e velocidade de avanço. Os valores de rugosidade

apresentados resultam dos valores médios de três medições de rugosidade efetuadas para cada ensaio.

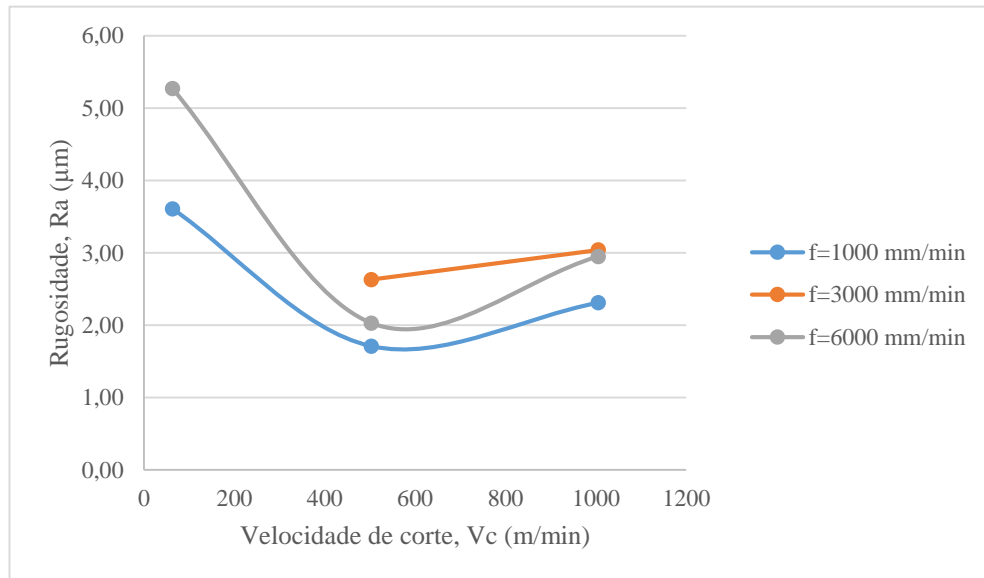


Figura 75 - Efeito da variação da velocidade de corte e da velocidade de avanço na rugosidade Ra

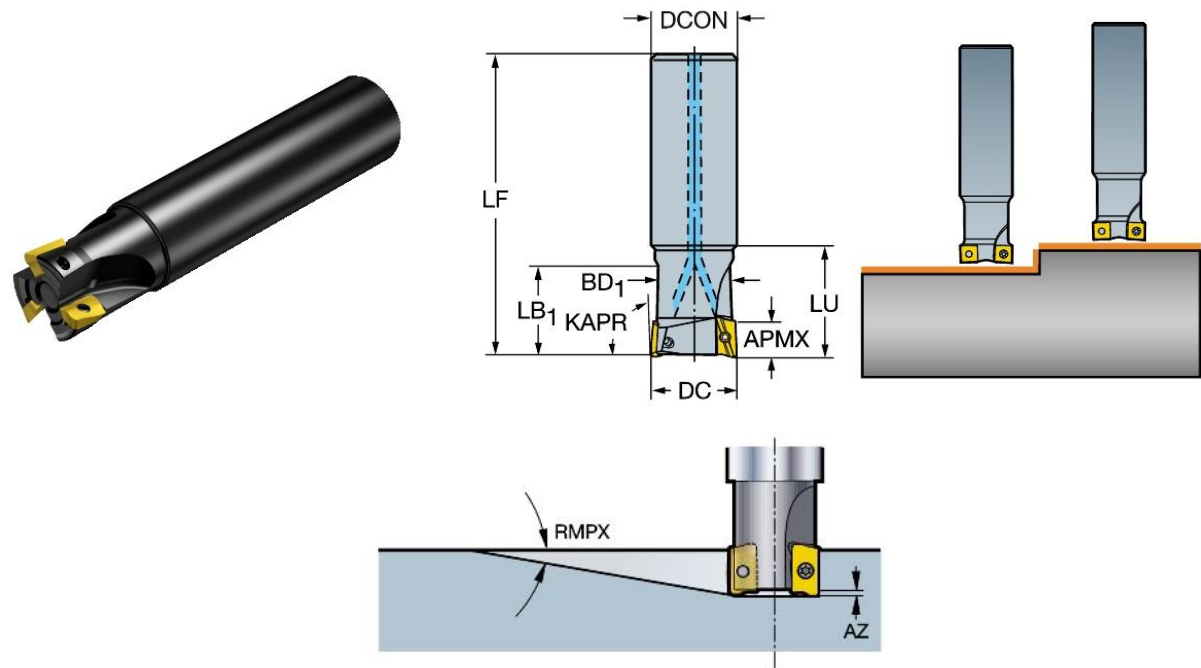
A Figura 75 mostra que a rugosidade Ra tem tendência a reduzir quando se usam velocidade de corte mais elevadas, apesar de se verificar um ligeiro aumento nos valores de Ra para 1005 m/min de velocidade de corte. A aumento da velocidade de avanço provoca aumento da rugosidade Ra, no entanto os resultados relativos a velocidade de avanço de 3000 mm/min são os mais elevados.

Os resultados dos ensaios preliminares não permitem tirar conclusões acerca da influência dos parâmetros de corte na maquinabilidade e qualidade superficial do gesso. Estes ensaios serviram de base para a formulação de um plano de ensaios mais rigoroso, mas também para familiarização com o processo de maquinagem de gesso e perceção da gama de parâmetros de corte a aplicar num material de maquinagem invulgar.

ANEXO B: Ficha técnica da ferramenta

A ferramenta CoroMill® 390 foi usada em todos os ensaios de maquinagem.

R390-020A20-11M - CoroMill® 390 square shoulder milling cutter

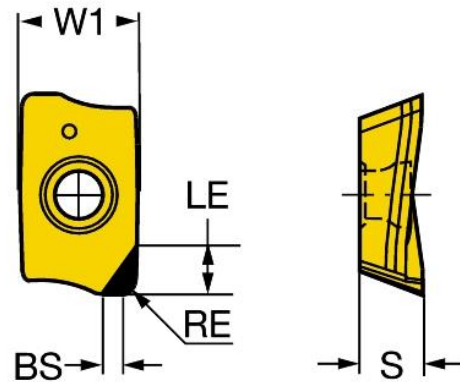
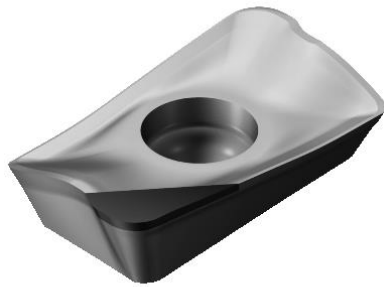


Availability	Ordering code
Life cycle state (LCS) Released Package quantity 1	ISO R390-020A20-11M ANSI R390-020A20-11M Material Id 5745478 EAN 11065946
Product data	
Cutting diameter (DC) 20 mm Cutting item count (CICCTOT) 3 Part 2 of cutting item interface identifiers(CUTINTMASTEREND) CoroMill 390 -size 11 (R390-11) Depth of cut maximum (APMXFW) 10 mm Depth of cut maximum (APMXFFW) 10 mm Depth of cut maximum (APMXEFW) 5.5 mm Maximum ramping angle (RMPXFFW) 5.5 deg Maximum plunge depth (AZ) 1 mm Usable length (LU) 25 mm Cutting pitch differential (CPDF) false Peripheral effective cutting edge count (ZEFP) 3 Adaptive interface machine direction (ADINTMS) Cylindrical shank without clamping features -metric: 20.0	Hand (HAND) R Damping property (DPC) false Coolant entry style code (CNSC) 1: axial concentric entry Coolant pressure (CP) 10 bar Connection diameter (DCON) 20 mm Functional length (LF) 110 mm Torque (TQEND) 1.2 Nm Body material code (BMC) Steel Rotational speed maximum (RPMX) 34600 r/min Weight of item (WT) 0.337 kg Life cycle state (LCS) Released Release pack id (RELEASEPACK) 98.3

ANEXO C: Ficha técnica das pastilhas PCD

As pastilhas de PCD foram usadas na primeira fase de ensaios de maquinagem e nos ensaios complementares de maquinagem.

R390-11T304E-P4-NL CD10 - Pastilha CoroMill® 390 para fresamento



Disponibilidade	Código para pedido
Ciclo de vida útil (LCS)	ISO
Publicado	R390-11T304E-P4-NL CD10
Quantidade do pacote	ANSI
5	R390-11T304E-P4-NL CD10
	Id do material
	5745449
	EAN
	11569180
Dados do produto	
Classificação de materiais nível 1 (TMC1ISO) N	
Tipo de operação (CTPT) Light	
Formato e tamanho da pastilha (CUTINTSIZESHAPE) CoroMill 390 -11T3	
Largura da pastilha (W1) 6,8 mm	
Código do formato da pastilha (SC) L	
Comprimento efetivo da aresta de corte (LE) 4 mm	
Comprimento da aresta alisadora (BS) 2,2 mm	
Raio do canto (RE) 0,4 mm	
Ângulo da aresta de corte principal (KRINS) 90 deg	
Sentido (HAND) R	
Classe (GRADE) CD10	
Substrato (SUBSTRATE) DP	
Cobertura (COATING) UNCOAT	
Espessura da pastilha (S) 3,59 mm	
Peso do item (WT) 0,002 kg	
Ciclo de vida útil (LCS) Publicado	
ID de liberação do pacote (RELEASEPACK) 03.2	
Valores iniciais	

N

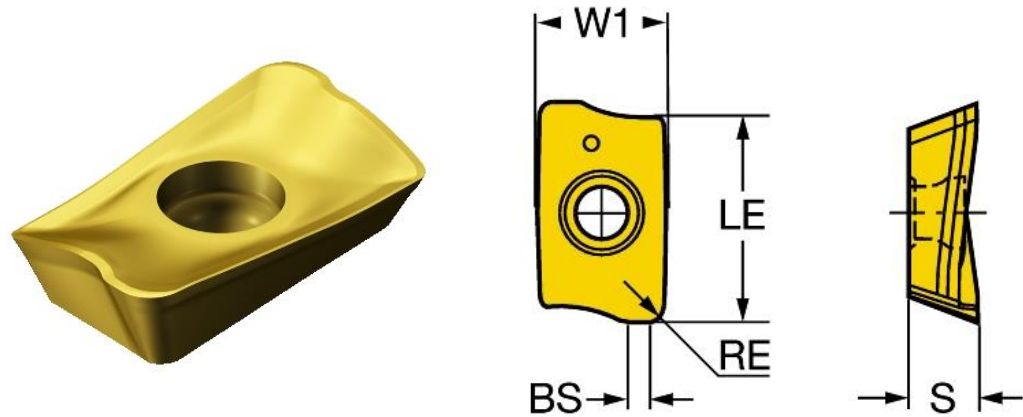
fz 0.17 mm(0.1-0.2)

vc 1860 m/min(1905-1845)

ANEXO D: Ficha técnica das pastilhas WC

As pastilhas de WC foram usadas na segunda fase de ensaios de maquinagem.

R390-11 T3 08M-MM S40T - CoroMill® 390 insert for milling



Availability	Ordering code
Life cycle state (LCS) Released	ISO R390-11 T3 08M-MM S40T
Package quantity 10	ANSI R390-11 T3 08M-MM S40T
	Material Id 5853482
	EAN 25853482
Product data	
Material classification level 1 (TMC1ISO) PMS	
Operation type (CTPT) Medium	
Insert size and shape (CUTINTSIZESHAPE) CoroMill 390 -11T3	
Insert width (W1) 6.8 mm	
Insert shape code (SC) L	
Cutting edge effective length (LE) 10 mm	
Wiper edge length (BS) 1.2 mm	
Corner radius (RE) 0.8 mm	
Major cutting edge angle (KRINS) 90 deg	
Hand (HAND) R	
Grade (GRADE) S40T	
Substrate (SUBSTRATE) HC	
Coating (COATING) CVD Ti(C,N)+Al2O3+TiN	
Insert thickness (S) 3.59 mm	
Weight of item (WT) 0.004 kg	
Life cycle state (LCS) Released	
Release pack id (RELEASEPACK) 10.1	

ANEXO E: Ficha técnica da Célula de carga e amplificador usado no estudo experimental

A célula de carga e o amplificador foram utilizados na primeira e segunda fases de ensaios de maquinagem para aquisição de dados relativos a esforços de corte.

Force



Multicomponent Dynamometer

Type 9257B

–5 ... 10 kN, Top Plate 100x170 mm

Quartz three-component dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force. The dynamometer has a great rigidity and consequently a high natural frequency. Its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces to be measured.

- Universal applicable
- For cutting force measurements
- Stable and reliable

Description

The dynamometer consists of four three-component force sensors fitted under high preload between a baseplate and a top plate. Each sensor contains three pairs of quartz plates, one sensitive to pressure in the z direction and the other two responding to shear in the x and y directions respectively. The force components are measured practically without displacement.

The outputs of the four built-in force sensors are connected inside the dynamometer in a way to allow multicomponent measurements of forces and moments to be performed. The eight output signals are available at the 9-conductor flange socket.

The four sensors are mounted ground-insulated. Therefore ground loop problems are largely eliminated.

The dynamometer is rustproof and protected against penetration of splashwater and cooling agents. Together with the connecting cable Type 1687B5/1689B5 and Type 1677A5/1679A5 it corresponds to the protection class IP67.

A special thermal isolation coating is integrated in the top plate which renders the dynamometer largely insensitive to temperature influences.

Application Examples

- Dynamic and quasistatic measurement of the three orthogonal components of a force
- Measuring cutting force when turning, milling, grinding etc. In conjunction with the calibrated partial ranges the high sensitivity and low threshold allow exact measurements on small tools and when grinding.
- Measurements on scale models in wind channels



Technical Data

Range	F_x, F_y, F_z	kN	–5 ... 5 ¹⁾
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	–5 ... 10 ²⁾
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	0 ... 500
	F_z	N	0 ... 1 000
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	0 ... 50
	F_z	N	0 ... 100
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	–7,5/7,5
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	–7,5/15
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈–7,5
	F_z	pC/N	≈–3,7
Linearity, all ranges		%FSO	±1
Hysteresis, all ranges		%FSO	±0,5
Cross talk		%	±2
Rigidity	c_x, c_y	kN/μm	>1
	c_z	kN/μm	>2
Natural frequency	$f_n(x, y, z)$	kHz	≈3,5 ⁴⁾
Natural frequency	$f_n(x, y)$	kHz	≈2,3 ⁴⁾
(mounted on flanges)	$f_n(z)$	kHz	≈3,5 ⁴⁾
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈220
Insulation resistance (20 °C)		Ω	>10 ¹³
Ground insulation		Ω	>10 ⁸
Protection class EN60529		–	IP67 ³⁾
Weight		kg	7,3
Clamping area	mm		100x170
Connection			Fischer flange, 9 pol. neg.

¹⁾ Application of force inside and max. 25 mm above top plate area

²⁾ Range for turning, application of force at point A

³⁾ With connecting cable Types 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5

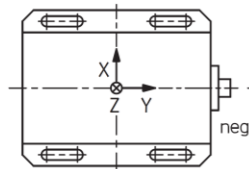
⁴⁾ Without tool holder Type 9403

Multicomponent Dynamometer, -5 ... 10 kN, Top Plate 100x170 mm, Type 9257B

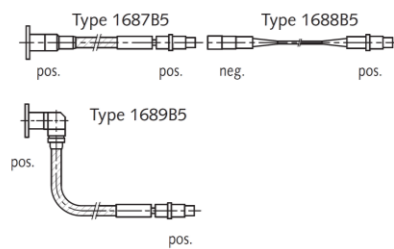
KISTLER
measure. analyze. innovate.

3-Component Force Measurement F_x , F_y , F_z with 4-Channel Charge Amplifier

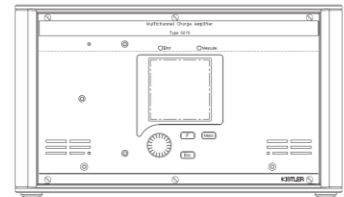
Dynamometer
Type 9257B



Cable



Charge Amplifier
Type 5070Ax01xx



3 output signals
from charge amplifier

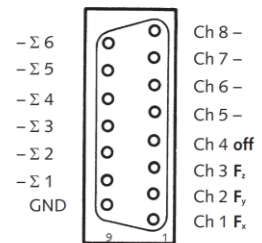
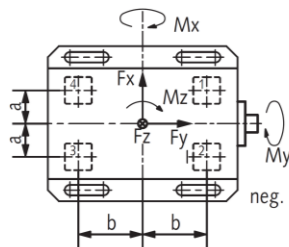


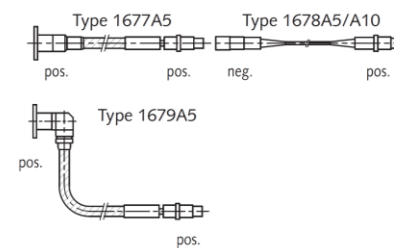
Fig. 3: Example of a measuring system with standard dynamometer

6-Component Force and Moment Measurement F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z with 8-Channel Charge Amplifier

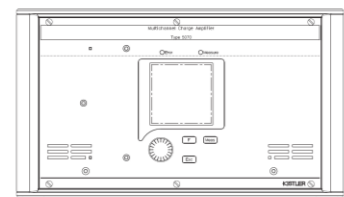
Dynamometer
Type 9257B



Cable



Charge Amplifier
Type 5070Ax11xx



8 output signals
from charge amplifier

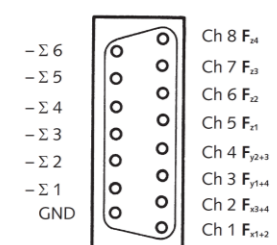


Fig. 4: Example of a measuring system with standard dynamometer

Multicomponent Dynamometer, -5 ... 10 kN, Top Plate 100x170 mm, Type 9257B

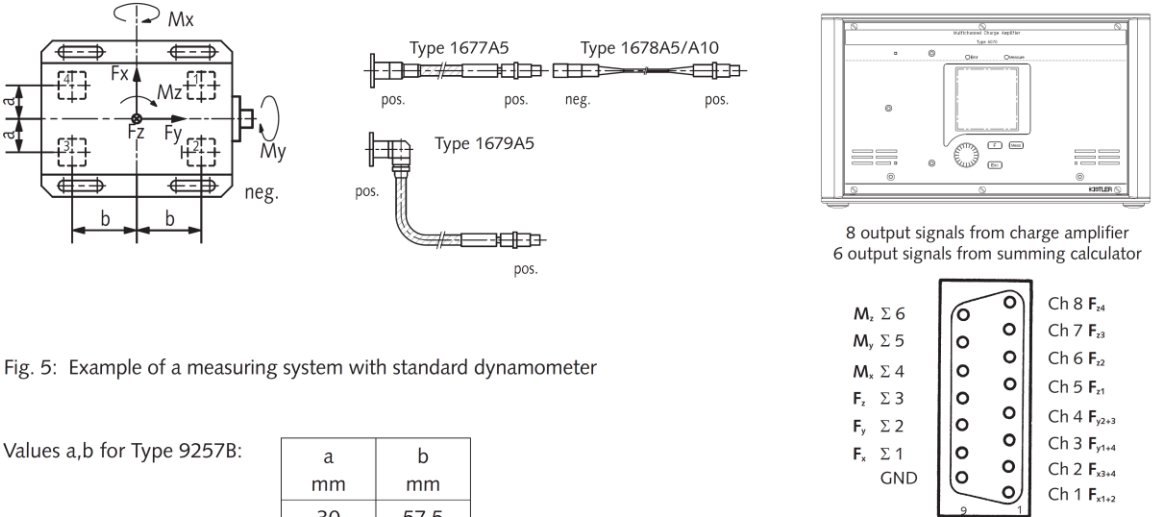


6-Component Force and Moment Measurement $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ with 8-Channel Charge Amplifier with 6-Component-Summing Calculator

Dynamometer
Type 9257B

Cable

Charge Amplifier
Type 5070Ax21xx



Mounting

The dynamometer may be mounted with screws or claws on any clean, face-ground supporting surface, such as the table of a machining tool for example. Uneven supporting surface may set up internal stresses, which will impose severe additional loads on the individual measuring elements and may also increase cross talk.

For mounting the force-introducing components, such as lathe tools and workpieces, fourteen M8x1,25 mm blind tap holes in the cover plate are available. The supporting surfaces for the force-introducing parts must be face-ground to obtain good mechanical coupling to the cover plate.

For satisfactory mounting of lathe tools up to 26x26 mm shank cross section, the tool holder Type 9403 may be used. This holder is not included in the standard accessories and must therefore be ordered separately.

Signal Conditioning

In addition to the dynamometer, a four-component measuring system needs a multi-core high-insulation connecting cable and four charge amplifier channels. These convert the charge

signals from the dynamometer into output voltages. The output voltage is proportional to the forces and moments occurring. The multichannel charge amplifier Type 5070A... is ideal for this purpose. For details, see the data sheet 5070A_000-485.

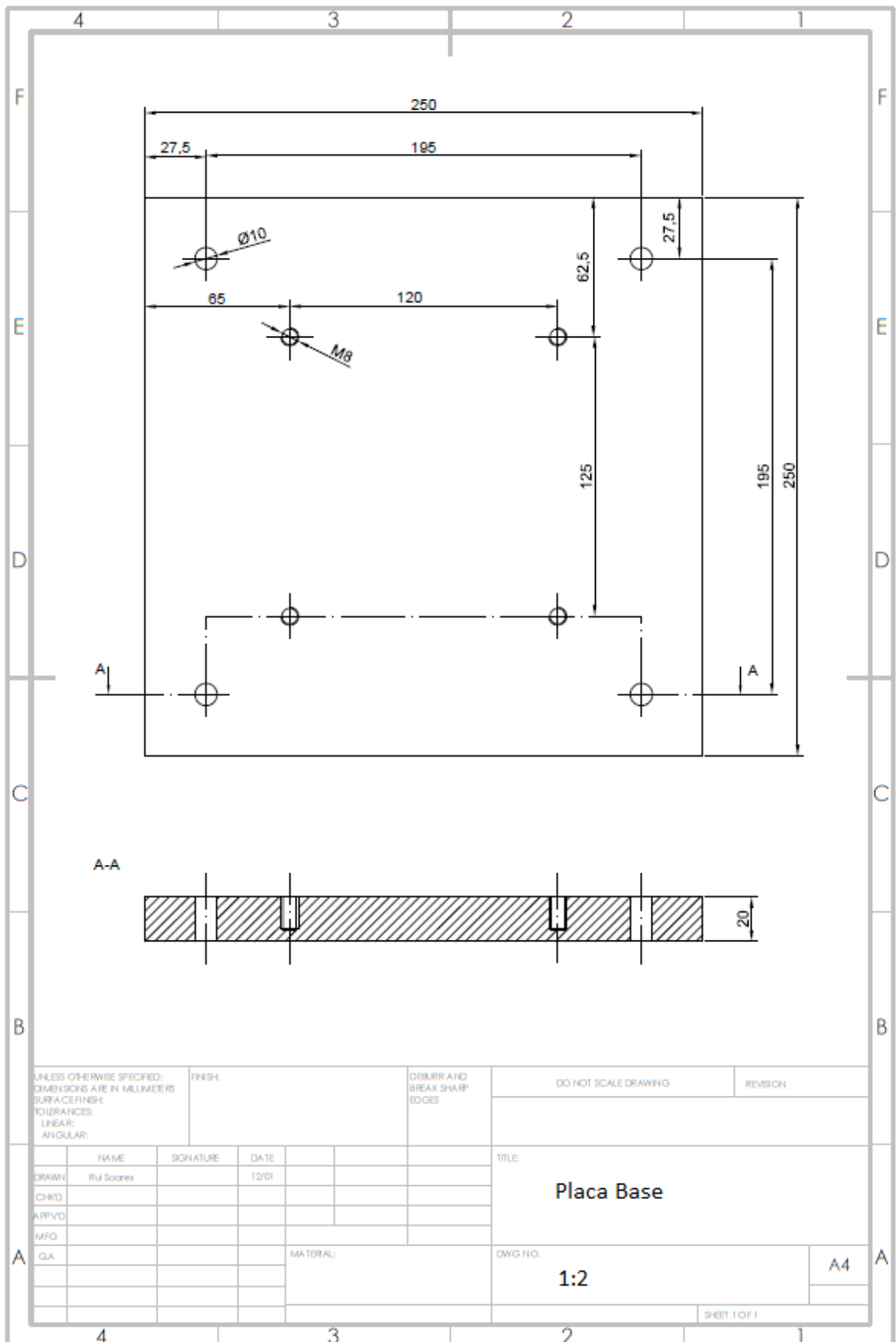
Data Acquisition and Evaluation

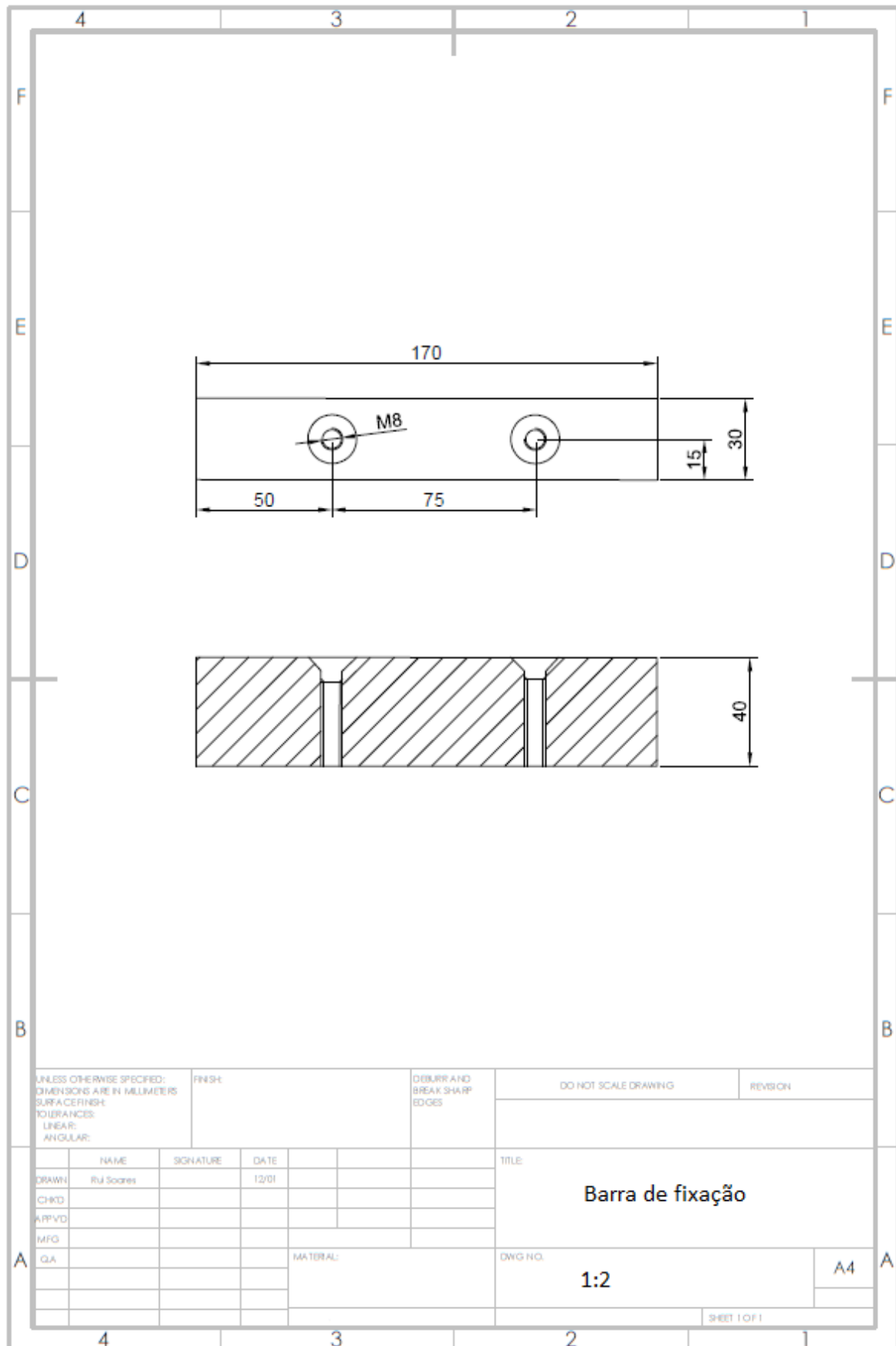
Kistler DynoWare is an easy to use universal software and is ideal for multi-component force measurement with dynamometers. For details, see the data sheet 2825A_000-371.

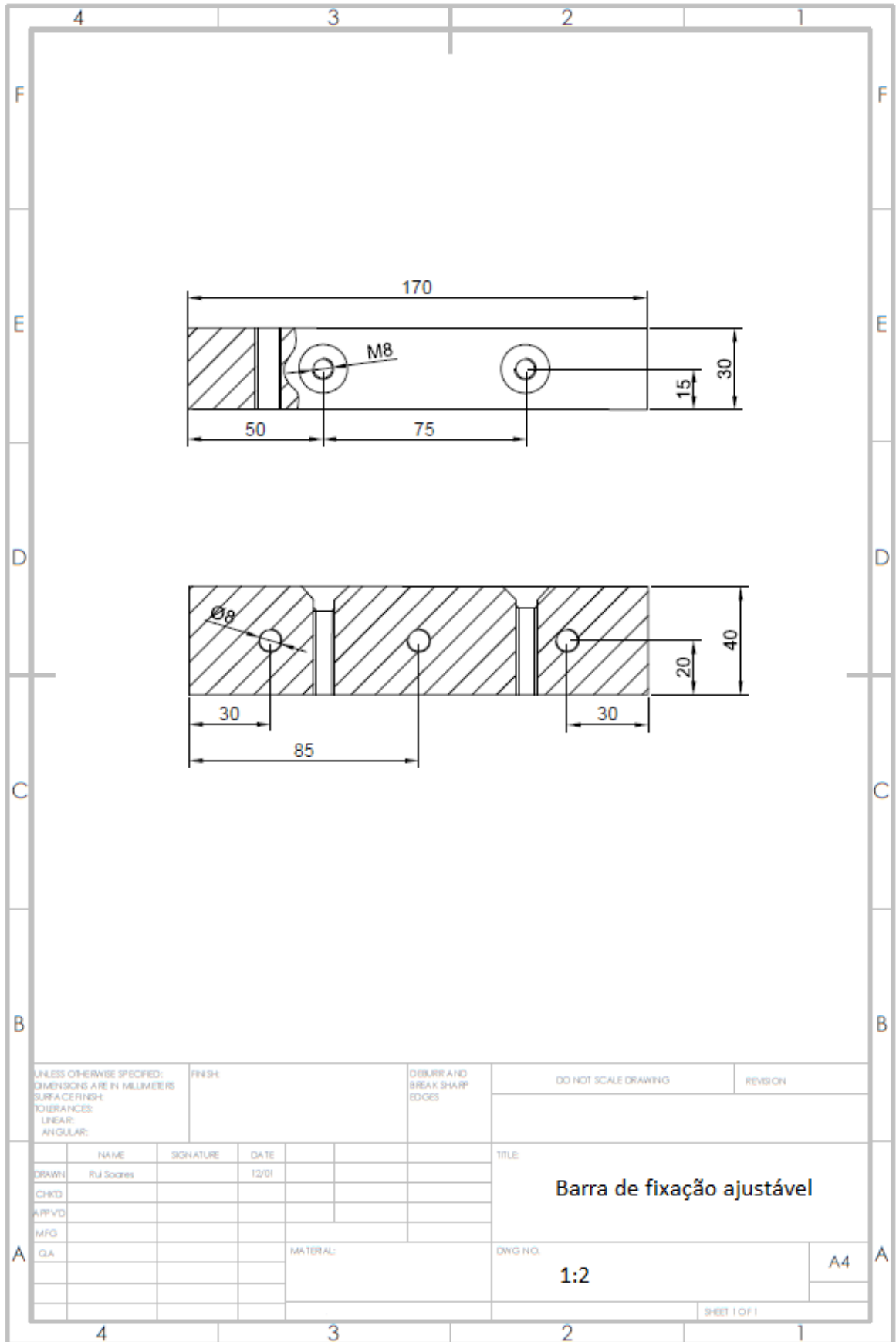
Optional Accessories

Optional Accessories	Type
• Tool holder	9403
• Connecting cable, length l = 5 m (3 leads)	1687B5
• Extension cable, length l = 5 m (3 leads)	1689B5
• Connecting cable, length l = 5 m (8 leads)	1677A5
• Extension cable, length l = 5 m (8 leads)	1679A5
• Connecting cable, length l = 5 m (8 leads)	1678A5

ANEXO F: Desenhos sistema de fixação da célula de carga e provetes







ANEXO G: Verificação medição rugosidades

Para confirmar a fiabilidade das medições de rugosidades efetuadas com o rugosímetro portátil *Hommel Tester T500*, fizeram-se novas medições a um conjunto de provetes com um perfilómetro fixo disponível no laboratório CETRIB. As medições foram efetuadas nas mesmas zonas da superfície maquinada (base do canal) para cada provete e com os mesmos parâmetros de palpação, nomeadamente 4,8mm de comprimento de avaliação (L_t) e 0,8mm de comprimento de base (L_c). Na Tabela 31 apresentam-se os valores médios das medições de rugosidades (R_a , R_z e R_{max}) obtidos pelos dois aparelhos e o desvio relativo.

Tabela 31 – Verificação de medição de rugosidades

Proвете		Rugosímetro <i>Hommel Tester T500</i>	Perfilómetro	Desvio Relativo (%)
1	Ra	3,37	3,47	2,88
	Rz	17,01	21,19	19,73
	Rmax	22,39	28,26	20,79
2	Ra	3,83	5,08	24,67
	Rz	18,73	25,92	27,72
	Rmax	25,86	37,62	31,25
3	Ra	3,94	4,8	17,97
	Rz	20,56	24,77	16,99
	Rmax	28,56	30,85	7,42
4	Ra	3,36	3,87	13,10
	Rz	18,79	22,23	15,50
	Rmax	24,34	34,7	29,85
5	Ra	3,58	3,45	-3,67
	Rz	18,29	19,98	8,46
	Rmax	25,00	25,09	0,37
6	Ra	3,03	3,57	15,14
	Rz	16,78	22,62	25,83
	Rmax	27,10	34,9	22,34
7	Ra	3,67	4,09	10,26
	Rz	20,03	25,77	22,25
	Rmax	26,90	43,51	38,18

De uma forma geral, as rugosidades medidas pelo perfilómetro são superiores às medidas com o rugosímetro. Note-se que os desvios relativos são geralmente inferiores para a rugosidade média, R_a . Considera-se que o desvio contido nestas medições não invalida a fiabilidade e consistência do rugosímetro portátil e, portanto, este é o equipamento usado para a medição de todas as rugosidades em estudo neste trabalho.